

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА СПЕЦІАЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ
ТА ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ УКРАЇНИ**
Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного
технічного університету України “КПІ”

Ю. О. ГОЛОВІН

**ОСНОВИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ
З РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

Навчальний посібник

Київ - 2016

УДК 621.396

ББК 32.882

Г- 61

Рецензент: д.т.н., проф. Науменко М.І.

Рекомендовано Вченою Радою Інституту Спецзв'язку НТУУ „КПІ” (Протокол № 6 від 26 березня 2015 р.)

Головін Ю.О. Основи радіозв'язку з рухомими об'єктами : навч. посіб. Київ : ІСЗЗІ НТУУ КПІ, 2016. 322 с.

Навчальний посібник «Основи радіозв'язку з рухомими об'єктами» призначений для слухачів (курсантів, студентів) напряму підготовки «Телекомунікації».

Посібник вміщує відомості про принципи побудови та організації систем рухомого радіозв'язку. Приведені необхідні теоретичні відомості про процеси функціонування систем радіодоступу, а саме, особливості розповсюдження радіохвиль УКХ - діапазону, основні математичні моделі для розрахунку втрат при розповсюдженні радіосигналу, методи множинного доступу, сучасні методи модуляції, особливості сигналів із розширеним спектром, організація фізичних та логічних каналів в системах радіодоступу тощо. Викладені в систематизованому виді основні технології та стандарти, побудова мереж та технічні характеристики пейджингових, транкінгових та стільникових систем зв'язку. Розглянуті особливості радіоінтерфейсів технологій безпроводового доступу стандартів *IEEE 802.11x*, *IEEE 802.15x*, *IEEE 802.16x* та інші, деякі аспекти інформаційної безпеки в стандарті стільникового зв'язку *GSM* та порядок проектування мереж.

Навчальний посібник забезпечує розгляд відповідних змістовних модулів навчальної дисципліни «*Системи мобільного зв'язку*».

© Головін Ю.О. 2016

ЗМІСТ

Список скорочень.....	6
ЧАСТИНА I. Основні відомості.	
1. Системи рухомого радіозв'язку.....	8
1.1. Класифікація систем рухомої служби.	
1.2. Принципи побудови систем.	
1.3. Основні характеристики.	
2. Особливості радіозв'язку з рухомими об'єктами.....	14
2.1. Радіочастотний діапазон для зв'язку з рухомими об'єктами.	
2.2. Вплив ефекту Доплера на радіозв'язок.	
2.3. Методи боротьби з наслідками багатопроменевого розповсюдження радіохвиль.	
3. Принципи побудови систем з множинним доступом.....	20
3.1. Використання каналів в системах з множинним доступом.	
3.2. Методи множинного доступу.	
3.3. Розподіл дуплексних каналів.	
4. Модуляція сигналу в системах рухомого зв'язку.....	29
4.1. Класифікація методів модуляції в системах радіодоступу.	
4.2. Диференційна квадратурна фазова маніпуляція зі зсувом $\pi/4$ ($\pi/4$ DQPSK).	
4.3. Маніпуляція з мінімальним зсувом (MSK).	
4.4. Мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів (OFDM)	
5. Сигнали з розширеним спектром	39
5.1. Загальні положення.	
5.2. Розширення спектру стрибкоподібною перебудовою частоти (FHSS).	
5.3. Розширення спектру методом прямої послідовності (DSSS).	
ЧАСТИНА II. Відомчі системи радіозв'язку.	
6. Принципи організації пейджингового зв'язку.....	45
6.1. Призначення та класифікація систем.	
6.2. Структура СПРВ і принципи їх функціонування.	
6.3. Характеристика радіосигналу СПРВ.	
6.4. Протоколи пейджингового зв'язку	
6.5. Структура повідомлення протоколу POCSAG.	
6.6. Характеристика основних елементів СПРВ	
7. Мережі транкінгового зв'язку.....	62
7.1. Загальні відомості та класифікація систем.	
7.2. Архітектура транкінгових систем.	
7.3. Транкінгові системи <i>SmartTrunk</i> .	
7.4. Транкінгові системи протоколу <i>MPT 1327</i> .	
7.5. Транкінгова система протоколу <i>LTR</i> .	
7.6. Особливості цифрових транкінгових систем.	
7.7. Транкінгова система стандарту <i>TETRA</i> .	
ЧАСТИНА III. Системи стільникового зв'язку.	
8. Стільникові мережі зв'язку.....	109
8.1. Загальні відомості. Класифікація систем.	
8.2. Архітектура мереж стільникового зв'язку.	
8.3. Аналогові стандарти стільникового зв'язку.	
8.4. Цифрові стандарти стільникового зв'язку.	
9. Організація каналів доступу.....	118
9.1. Смуги частот стільникового зв'язку.	
9.2. Структура клітин та принцип повторного використання частот.	
9.3. Способи збільшення пропускної спроможності мережі.	
10. Формування каналів в мережах стільникового зв'язку стандарту GSM.....	127
10.1. Загальні положення.	

10.2. Організація частотних та фізичних каналів.	
10.3. Структура ефірного інтерфейсу.	
10.4. Типи логічних каналів	
10.5. Комбінації логічних каналів в фізичних каналах.	
11. Обладнання підсистеми базових станцій (BSS)	142
11.1. Базова приймально-передавальна станція (BTS).	
11.2. Контролер базових станцій (BSC).	
11.3. Модуль транскодера (TCE).	
12. Обладнання комутаційної підсистеми (SSS)	153
12.1. Архітектура і функції центру комутації мобільної служби (MSC).	
12.2. Центр перевірки автентичності (AUC).	
12.3. Регістр ідентифікації мобільного обладнання.	
13. Формування сигналу в радіоканалі	163
13.1. Аналого-цифрове перетворення.	
13.2. Кодування мови.	
13.3. Канальне кодування.	
13.4. Модуляція.	
14. Мобільна станція	174
14.1. Класи мобільних (абонентських) станцій.	
14.2. Функції та архітектура мобільної станції.	
14.3. Основні параметри станції.	
14.4. Динамічне регулювання потужністю мобільної станції.	
15. Інформаційна безпека в системах стільникового зв'язку	181
15.1. Загальна характеристика безпеки зв'язку.	
15.2. Автентифікація та шифрування даних.	
15.3. Модуль відповідності абонента.	
16. Процес обслуговування виклику	191
16.1. Алгоритми функціонування систем стільникового зв'язку.	
16.2. Зони обслуговування стільникової мережі.	
16.3. Нумерація. MCC- та MNC- коди країн та операторів.	
17. Технології передачі даних в мережах GSM	199
17.1. Еволюція мереж GSM.	
17.2. Високошвидкісна передача даних з комутацією каналів HSCSD.	
17.3. Радіослужба пакетної передачі GPRS.	
17.4. Технологія EDGE.	
18. Стільникові мережі технології CDMA	206
18.1. Принцип кодового розподілу каналів.	
18.2. Канальне кодування і модуляція в стандарті IS-95.	
19. Функціонування стільникової системи стандарту CDMA	213
19.1. Основні технічні характеристики систем CDMAone.	
19.2. Конфігурація мережі CDMA.	
19.3. Особливості регулювання потужності.	
20. Проектування мереж стільникового зв'язку	220
20.1. Цілі та завдання проектування.	
20.2. Методи проектування мереж стільникового зв'язку.	
20.3. Планування ємності мережі.	
21. Розрахунок зони радіодоступу в стільникових мережах	227
21.1. Загальні положення.	
21.2. Математичні моделі для розрахунку втрат при розповсюдженні сигналу.	
21.3. Визначення середніх втрат потужності сигналу на трасі в стільникових мережах згідно моделі Окамура-Хата.	
22. Системи стільникового зв'язку III та IV поколінь	240
22.1. Основні положення програми IMT-2000.	
22.2. Радіоінтерфейс WCDMA.	
22.3. Архітектура мережі UMTS	
22.4. Підсистема UTRAN.	

22.5. Особливості стандарту <i>CDMA2000</i> .	
22.6. Архітектура мережі <i>LTE</i> .	
ЧАСТИНА IV. Системи радіотелефонії та безпроводового доступу.	
23. Мережі безпроводового радіотелефонного зв'язку	269
23.1. Загальні відомості.	
23.2. Вузкосмугові системи безпроводового абонентського радіодоступу.	
23.3. Особливості широкосмугових безпроводових абонентських систем.	
24. Технології безпроводових мереж передачі даних	279
24.1. Особливості та класифікація безпроводових мереж.	
24.2. Технології безпроводових локальних мереж <i>Wi-Fi</i> . Сімейство стандартів <i>IEEE 802.11x</i> .	
24.3. Радіоспецифікація безпроводових персональних мереж <i>Bluetooth</i> . Стандарт <i>IEEE 802.15.x</i> .	
24.4. Радіоінтерфейс міських безпроводових мереж <i>WiMAX</i> . Стандарт <i>IEEE 802.16x</i> .	
ЧАСТИНА V. Системи визначення власного місцезнаходження.	
25. Супутникова система навігації	308
25.1. Призначення та загальна структура системи.	
25.2. Принцип роботи системи.	
25.3. Структура навігаційних радіосигналів.	
25.4. Точність вимірювання координат.	
25.5. Абонентське обладнання.	
Література	322

Список скорочень

АПЧ – автоматичне підстроювання частоти
АС – абонентська станція
АТ – абонентській термінал
АТС – автоматична телефонна станція
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
БОС – блок обробки сигналу
БППС – базова приймально-передавальна станція
БС – базова станція
БУ – блок управління
ДІ – джерело інформації
ДП – довгострокове прогнозування
ДС – дисплей
ЕМС – електромагнітна сумісність
ЗМ – змішувач
ЗСК – завадостійке кодування
ЗТП – загальний тракт прийому
ІКМ – імпульсно-кодова модуляція
КБС – контролер базових станцій
КС – комутаційна підсистема
ЛП – лінійне прогнозування
МДЧТР – множинний доступ з частотним розподілом каналів
МДЧсР – множинний доступ з часовим розподілом каналів
МДКР – множинний доступ з кодовим розподілом каналів
МС – мобільна станція
МСЕ - Міжнародний Союз Електрозв'язку
НВЧ – надвисока частота
ПВ – псевдовипадкова послідовність
ПерЧ – перетворювач частоти
ПК – персональний комп'ютер
ПНЧ – підсилювач низької частоти
ПО – підсилювач-обмежник
ППЗП – перепрограмувальний запам'ятовуючий пристрій
ПРД – індивідуальний (канальний) передавач
ПРМ – індивідуальний (канальний) приймач
ПРС – перемикач режиму сигналізації
ПС – пристрій сигналізації
ПТ – пейджерний термінал
РІМО – реєстр ідентифікації мобільного обладнання
РМВА- реєстр місця знаходження відвідуємих абонентів
РПП – радіоприймальний пристрій
СБС – підсистема базових станцій
СД – світлодіод
СЗІ – система збору інформації
СІ – споживач інформації
СРЗ – система рухомого зв'язку
СПРВ – система персонального радіовиклику

ССЗ – система стільникового зв'язку
ТД – точка доступу
ТО – технічне обслуговування
ТОЕ – термінал технічного обслуговування й експлуатації
ТТ – тактильна сигналізація
ФД – фазовий детектор
ФІ – формувач імпульсів
ФЗЛ - фазоздвигаючий ланцюг
ФНЧ – фільтр нижніх частот
ФР - фазорозширювач
ЦЕ – центр експлуатації
ЦК – центр комутації
ЦКМС – центр комутації мобільної служби
ЦПА – центр перевірки автентичності абонента
ЦПРД – центральний передавач
ЦПРМ – центральний приймач
ЦРС – центральна радіостанція
ЧД – частотний детектор
ШПС – шумоподібний сигнал

ЧАСТИНА I. Основні відомості.

1. Системи рухомого радіозв'язку

Зв'язок є однією з галузей інфраструктури сучасного суспільства, яка найбільш динамічно розвивається. В концепції універсального персонального зв'язку, яка активно впроваджується Міжнародним Союзом Електрозв'язку (МСЕ), велике місце приділяється **рухомій службі** радіозв'язку. Вже сьогодні радіозв'язок використовується між мобільними (рухомими) об'єктами, що знаходяться на суші, воді й в атмосфері Землі. Сучасні системи рухомого зв'язку (СРЗ) забезпечують рухомі і стаціонарні об'єкти телефонним зв'язком, відеозв'язком, передачу різного роду графічної інформації, даних, доступ до мережі Інтернет.

До переваг рухомої служби радіозв'язку можливо віднести наступне:

- дозволяють надавати абоненту послуги зв'язку в будь-якому місці в межах зон дії наземних або супутникових мереж;
- відносно швидке розгортання мереж;
- використовуються малогабаритні універсальні абонентські термінали, які можуть бути підключені до персональних комп'ютерів (ПК).

Рухомий (мобільний) зв'язок – це електрозв'язок із застосуванням радіотехнологій, під час якого кінцеве обладнання хоча б одного із споживачів може вільно переміщатися в межах усіх пунктів закінчення телекомунікаційної мережі, зберігаючи єдиний ідентифікаційний номер мобільної станції.

1.1. Класифікація систем рухомої служби

За місцезнаходженням абонентських або базових станцій:

- наземні;
- морські;
- повітряні;
- супутникові;
- комбіновані.

Згідно Регламенту Радіозв'язку **наземна рухома служба** – це служба радіозв'язку між базовими та наземними рухомими станціями, або між наземними рухомими станціями.

Примітка: надалі будемо розглядати особливості побудови і застосування тільки елементів наземної рухомої служби.

За видом сигналів, що використовуються, і відповідною апаратурою:

- аналогові - системи, в яких мова передається по радіоканалу в **аналоговій** формі;;
- цифрові - системи, в яких мова передається по радіоканалу в **цифровій** формі.

Примітка: сигнали керування завжди передаються в цифровій формі!!

За методом множинного доступу:

- частотний (*FDMA*);
- часовий (*TDMA*);
- кодовий (*CDMA*);
- просторовий (*SDMA*).

За ступенем рухомості абонентів:

- рухомі;
- фіксовані.

За наявністю підключення до мереж загального користування:

- без підключення;
- з підключенням.

За послугами, що надаються користувачу,:

- передача мови;
- передача даних;
- передача персонального виклику;
- передача мультимедії та ін.

За категоріями користувачів системи рухомого зв'язку підрозділяються на:

- відомчі системи;
- системи загального користування.

За принципами побудови та призначенням розрізняють наступні системи наземного рухомого зв'язку:

1. Професійні системи мобільного радіозв'язку (*PMR - Professional Mobile Radio* та *PAMR – Public Access Mobile Radio*).
2. Системи персонального радіовиклику (*Paging System*).
3. Системи стільникового зв'язку (*Cellular Radio System*).
4. Системи бездротової телефонії (*CT - Cordless Telephone* або *WLL - Wireless Local Loop*) та беспроводової передачі даних.

Перші системи (професійні - *PMR*) відносяться до відомчих. Вони створювалися і розвивалися в інтересах державних структур, швидкої допомоги, поліції, пожежних бригад тощо, а також для комерційних структур. Ці системи різні за своїми технічними характеристиками, діапазонами частот, видами сигналів, потужністю передавачів, що не дозволяло ефективно використовувати частотний спектр.

Три наступні системи відносяться до систем сухопутного рухомого зв'язку загального застосування і позбавлені цих недоліків. Вони використовуються абонентами різних відомств і організацій, а також в мережах загального користування. Крім того, за своїми технічними та економічними показниками останні значно перевершують відомчі.

За розміром зони обслуговування СРЗ поділяються на:

- системи з великими зонами обслуговування (радіальний принцип);
- системи з малими зонами обслуговування (зоновий - стільниковий принцип);
- комбіновані (радіально-зоновий принцип).

До перших систем відносяться професійні системи і системи персонального радіовиклику. До других систем відносяться системи стільникового зв'язку.

За способом встановлення зв'язку між абонентами СРЗ поділяються:

- через базову станцію;
- безпосередньо між абонентами - за принципом "кожний з кожним".

За способом використання частотного ресурсу СРЗ бувають:

- системи зв'язку з закріпленими за абонентами каналами зв'язку;
- системи зв'язку з вільним доступом абонентів до загального частотного ресурсу;
- системи зв'язку з просторово - рознесеним повторним використанням частот.

Фіксоване закріплення частотних каналів знижує ефективність використання частотного ресурсу, але значно підвищує оперативність встановлення зв'язку.

Крім того, за використанням каналів для передачі/прийому СРЗ поділяються на:

- симплексні;
- напівдуплексні;
- дуплексні.

За способом комутації в мережі:

- із комутацією каналів;
- із комутацією пакетів.

1.2. Принципи побудови систем

Професійні СРЗ PMR, як правило, працюють на закріплених частотах в радіонапрямах або радіомережах. Найбільш ефективно використання виділеного частотного ресурсу забезпечується в системах *PAMR* з вільним доступом абонентів до загального частотного ресурсу, що одержали назву транкінгових (від англійського «*TRUNK*» – магістраль, шина, стовбур). Такі системи мають декілька фізичних (як правило, частотних) каналів, кожний з яких може бути наданий на сеанс зв'язку любому абоненту цієї системи. Після закінчення розмови цим каналом може скористатися інший абонент системи. Зв'язок здійснюється через *базову станцію* (БС) (хоча мається можливість працювати в групі без БС, якщо дозволяє дальність зв'язку). Звичайно прагнуть максимально збільшити зону дії, яка може досягати 40...50 км і більше, що вимагає в порівнянні зі стільниковим зв'язком більшої потужності передавачів (як БС так і абонентських терміналів), більшої втрати енергії джерел живлення, великі габарити і масу *абонентських терміналів* (АТ). Ці системи працюють в діапазоні метрових і дециметрових хвиль.

Загальною тенденцією розвитку професійних систем рухомого радіозв'язку є перехід від аналогових стандартів до єдиних міжнародних цифрових стандартів, що забезпечують конфіденційність і підвищену якість зв'язку, більш ефективно використання частотного діапазону,

роумінг для всіх абонентів і можливість передачі даних з високою швидкістю.

Системи персонального радіовиклику (СПРВ) гармонійно поєднують системи радіозв'язку і передачі даних. **Персональний радіовиклик (пейджинг)** – це послуга електрозв'язку, яка забезпечує безпроводову односторонню передачу інформації (цифрової або текстової) у межах зони, що обслуговується. По своєму призначенню розділяються на відомчі і загального користування.

Відомчі СПРВ забезпечують передачу повідомлень у локальних зонах або на обмеженій території в інтересах окремих груп користувачів.

Під СПРВ загального користування розуміється сукупність технічних засобів, через які за допомогою ТЛФ мереж загального користування відбувається передача в радіоканалі повідомлень обмеженого обсягу. Передача повідомлень на абонентські приймачі (пейджери) здійснюється диспетчерами через базову станцію. Пейджери здійснюють прийом тільки тих повідомлень, що їм адресовані. Радіус зони дії системи може досягати 100 км. Використовуються метрові і дециметрові хвилі.

Системи транкінгового зв'язку і системи персонального радіовиклику відносяться до радіальних і радіально-зонових структур мереж. Вони характеризуються рядом недоліків, основними з яких є:

- обмеженість зони обслуговування;
- нераціональне використання наявного частотного ресурсу;
- неможливість істотного збільшення числа абонентів, що обслуговуються, через появу взаємних завад.

В умовах обмеженого частотного ресурсу була запропонована **стільникова ідеологія** побудови мереж радіозв'язку, що дозволяє використовувати ті ж самі частотні канали в декількох осередках (стільниках), що розміщуються на такій відстані, яка забезпечує усунення взаємних завад. Це має назву частотно-територіального розподілу каналів.

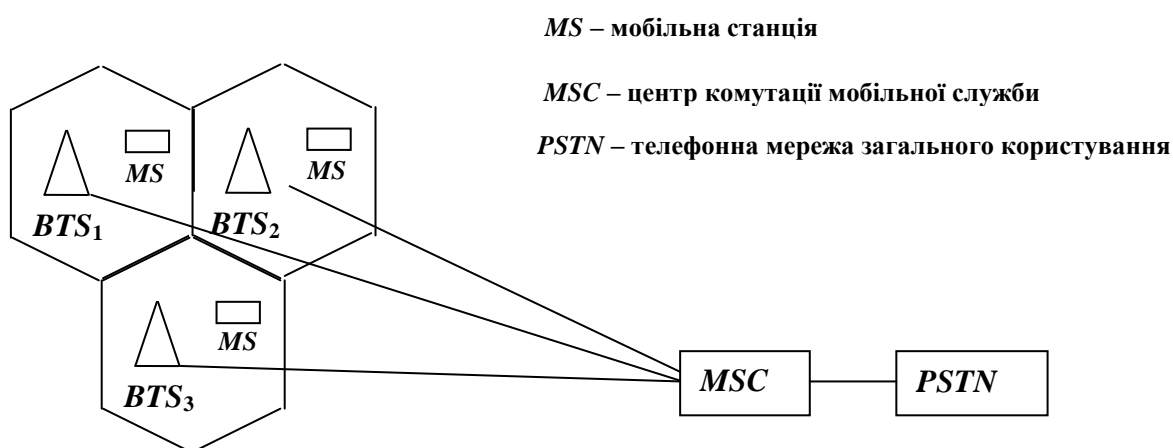


Рис.1.1. Фрагмент стільникової мережі

Ідея стільникового зв'язку (рис.1.1) полягає в тому, що площа, яка підлягає обслуговуванню, покривається мережею базових приймально-передавальних станцій (*BTS*), кожна з яких працює на відповідних

частотних каналах, які в сусідніх чарунках не повторюються. Потужність базових станцій та розміщення (направлення) їх антен вибираються такими, щоб забезпечити радіопокриттям **тільки** визначену окрему чарунку загальної зони обслуговування. Це дозволяє повторно використовувати такі ж самі частотні канали на базових станціях інших несуміжних стільників, які віддалені на відповідній відстані. При переміщенні *MS* через границю зони обслуговування *BTS* (стільника) забезпечується автоматичне і непомітне для абонента переключення обслуговування з однієї базової станції на іншу. Зменшення розмірів стільників забезпечує підвищення ефективності використання спектра радіочастот.

Сучасні технології забезпечують абонентам стільникового зв'язку високу якість мовних повідомлень, передачу даних та зображень. Для цього використовують діапазон дециметрових хвиль (450, 800, 900, 1800, 1900, 2100 МГц).

Системи безпроводових телефонів (СТ або WLL) з'явилися як альтернатива кабельним абонентським лініям зв'язку на місцевих телефонних мережах. Гнучка технологія *WLL* дозволяє забезпечувати потребу в послугах зв'язку у всіляких умовах – від густонаселених районів міст з історично ланцюговою забудовою, швидко зростаючих пригородів і дачних селищ, районів з котеджною забудовою, малих міст до малонаселеної сільської місцевості без розвитої інфраструктури електрозв'язку.

Найбільш відомі стандарти технології для даного виду зв'язку це *DECT* у діапазоні 1,9 ГГц, *CT2* у діапазоні 900 МГц. В останні роки, завдяки розробкам відомих фірм (*Motorola, Qualcomm, NEC*), з'явилися й інші ефективні спеціалізовані системи безпроводового доступу, це *TDMA, CDMA*. Крім того, можна використовувати й існуючі технології стільникового зв'язку.

У зв'язку із зростанням кількості засобів обчислювальної техніки, необхідності організації високошвидкісних з'єднань між ними та доступу до мережі *INTERNET* із урахуванням можливої мобільності абонентів, стали розроблятися безпроводові рішення (*Radio Ethernet*), як альтернатива проводимим мережам передачі даних. Існує безліч безпроводових технологій, які часто відомі користувачам по їх маркетинговим назвам, таким як *Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth*. Кожна з цих технологій володіє певними характеристиками, які визначають їх область застосування.

1.3. Основні характеристики

1. Спрямованість зв'язку:
 - однобічний радіозв'язок;
 - двобічний радіозв'язок.
2. Метод формування каналів для напрямків передачі та прийому:
 - симплексний;
 - напівдуплексний;
 - дуплексний.

3. Керування в СРЗ:
 - координоване, контрольоване (забезпечує вихід у ТЛФ мережі загального користування);
 - некоординоване, неконтрольоване.
4. Характеристика зон обслуговування СРЗ:
 - радіальний тип зони;
 - лінійний тип зони (уздовж доріг, газопроводів);
 - зонний тип.
5. Ємність СРЗ:
 - мінімальна система (до 100 абонентів);
 - мала система (до 1000 абонентів);
 - середня система (до 10 000 абонентів);
 - велика система (> 10 000 абонентів).
6. Спосіб з'єднання радіомережі зі стаціонарної ТЛФ мережею:
 - через диспетчера;
 - автоматично.
7. Вид інформації, що передається (мова, дані, зображення, відео ...).
8. Діапазон частот.
9. Вид представлення інформаційних сигналів і сигналів керування:
 - аналоговий;
 - цифровий.
10. Метод множинного доступу:
 - частотний;
 - частотно-часовий;
 - кодовий.
11. Метод комутації:
 - комутація каналів;
 - комутація пакетів.

2. Особливості радіозв'язку з рухомими об'єктами.

2.1. Радіочастотний діапазон для зв'язку з рухомими об'єктами.

Радіо і світлові хвилі мають електромагнітну природу, і для них зв'язок між частотою і довжиною хвилі визначається формулою:

$$\lambda_{[м]} = \frac{300}{f_{[МГц]}}$$

де λ - довжина хвилі;
 f - частота.

Для зв'язку з рухомими об'єктами використовуються діапазони метрових (дуже високі частоти – VHF) ($F=30 \div 300$ МГц, $\lambda=1 \div 10$ м) і дециметрових хвиль (ультрависокі частоти – UHF) ($F=300 \div 3000$ МГц, $\lambda=0,1 \div 1$ м).

Це обумовлено:

- можливістю повторного використання частот (радіохвилі цих діапазонів розповсюджуються тільки земною хвилею на відстань практично прямої видимості);
- застосуванням мобільних антен малих розмірів (геометричні розміри антени залежать від довжини хвилі випромінювання);
- достатньо великою частотною ємністю цих діапазонів.

Поширення радіохвиль в цих діапазонах характеризуються наступним:

- зоною поширення є шар тропосфери, що знаходиться безпосередньо над поверхнею Землі, а не траєкторія за рахунок відбиття від шарів іоносфери (крім сигналів з частотою до 70 МГц у певні пори року та час доби);
- мала дифракційна здатність;
- залежність дальності від рельєфу місцевості і незалежність від пори року та часу доби;
- залежність затухання від частоти – зі збільшенням частоти затухання зростає;
- поглинання радіохвиль поверхнею ґрунту та місцевими предметами;
- відбиття від будівель і металевих конструкцій, що приводить до багатопроменевого розповсюдження;
- значне поглинання сигналів з вертикальною поляризацією лісовою рослинністю;
- збільшення дальності над поверхнями з високою електропровідністю та діелектричною проникністю (наприклад, над водною поверхнею).

Фізичні властивості середовища, у якому поширюється хвиля, а також об'єкти на шляху її поширення, роблять різний (і дуже істотний) вплив на параметри хвилі. При цьому характерні наступні явища: *поглинання, рефракція, дифракція, відбиття, багатопроменеве розповсюдження радіохвиль, доплерівський ефект, радіогоризонт* і інше. Докладніше зупинимося на радіогоризонті і доплерівському ефекті.

Радіогоризонт – це геометричне місце точок на поверхні Землі, в яких прямі промені від джерела радіохвиль є дотичними до земної поверхні.

Радіогоризонт у діапазонах ДВЧ/УВЧ приблизно на 15 % триваліше, ніж видимий за рахунок викривлення траєкторії поширення радіохвиль, зумовлених неоднорідністю атмосфери (рефракції). Для розрахунку радіогоризонту в цих діапазонах з урахуванням рефракції використовують наступний вираз:

$$R_{[км]} = 4,12 \left(\sqrt{h_{1[м]}} + \sqrt{h_{2[м]}} \right),$$

де h_1 і h_2 - висоти підвісу передавальної та приймальної антен відповідно.

В найпростішому випадку (рис. 3.1) в радіоканалі прямої видимості за відсутності віддзеркалень потужність сигналу на вході приймального пристрою визначається виразом:

$$P_{ПРМ} = \frac{P_{ПРД} \eta_{ПРД} G_{ПРД} G_{ПРМ} \eta_{ПРМ}}{L_0 L_{ДОД}},$$

де $G_{ПРД}$, $G_{ПРМ}$ - коефіцієнти направленої дії передавальної і приймальної антен;

$\eta_{ПРД}$, $\eta_{ПРМ}$ - коефіцієнти передачі фідерних трактів передавача і приймача;

L_0 - втрати у вільному просторі:

$$L_0 = \frac{(4\pi R)^2}{\lambda^2},$$

де R - відстань між передавачем і приймачем;

$\lambda = C/f$ - довжина хвилі несучого коливання.

$L_{ДОД}$ - додаткові втрати, залежні від дії атмосфери, дощу, відмінностей поляризації передаючої і приймальної антен та ін.

$$L_{ДОД} = L_a \cdot L_d \cdot L_p \cdot L^*$$

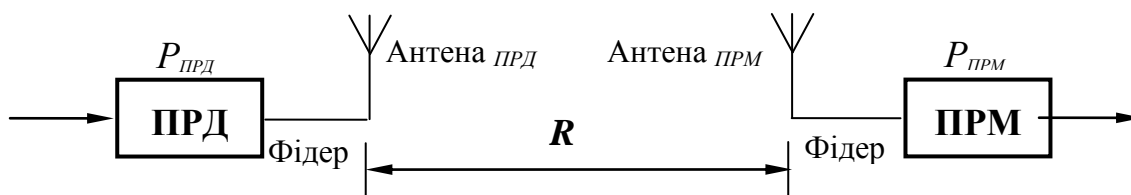


Рис. 2.1. Модель розповсюдження радіохвиль з прямою видимістю.

Існує велика кількість моделей для розрахунку загасання сигналу в різних умовах використання. Так, при проектуванні мереж стільникового зв'язку часто використовують модель Окамура - Хати.

В якості початкових даних для цієї моделі був прийнятий докладний аналіз району Токіо і отримана інформація про втрати в радіоканалі для міського середовища (*typical urban*):

$$L_0 [\text{дБ}] = 69,55 + 26,16 \cdot \lg f_c - 13,82 \cdot \lg h_{ПРД} - A(h_{ПРМ}) + \\ + (44,9 - 6,55 \cdot \lg h_{ПРД}) \cdot \lg d,$$

де f_c - частота несучої сигналу (0,15...1,5 МГц);

$h_{ПРД}$ - висота передавальної антени (30...300 м);

$h_{ПРМ}$ - висота приймальної антени (1...10 м);

d - відстань між антенами в кілометрах (1...20 км);

$A(h_{ПРМ})$ - поправочний коефіцієнт, який залежить від типу місцевості.

Для застосування моделі Окамури – Хати для більш високих діапазонів часто, наприклад для 1800 МГц, вживають додаткові поправочні коефіцієнти.

2.2. Вплив ефекту Доплера на радіозв'язок

Доплерівський ефект в радіозв'язку приводить до появи зсуву частоти сигналу в точці прийому, який виникає при відносному русі передавача та/або приймача.

Коли мобільний приймач рухається до передавача, кожний наступний цикл коливань хвилі радіосигналу повинний пройти меншу відстань до приймальної антени в порівнянні з попереднім і прийнята частота зростає. Коли ж мобільний приймач віддаляється від передавача, то доплерівський зсув має від'ємний знак і прийнята частота зменшується.

Ця частота (f_d) зсуву визначається по формулі:

$$f_d = \frac{V}{C} \cdot f_{\text{прд}} \cdot \cos(\theta),$$

де V - швидкість пересування приймача на транспортному засобі;

C - швидкість світла;

$f_{\text{прд}}$ - частота передавача.

Коли приймач рухається під кутом (θ) до передавача, то частотний зсув f_d змінюється ще на значення $\cos(\theta)$.

Приклад: мобільний приймач рухається в протилежний бік від передавача зі швидкістю $V=100$ км/годину, частота випромінювання передавача $f_{\text{прд}}=1,8$ ГГц. Доплерівський зсув дорівнює $f_d = 166,5$ Гц та має від'ємний знак.

Негативні наслідки доплерівського ефекту компенсуються роботою системи АПЧ приймача. Як правило, в технічній документації системи радіодоступу визначається максимально можлива швидкість пересування абонентського обладнання.

2.3. Методи боротьби з наслідками багатопроменевого розповсюдження радіохвиль.

Як було відзначено раніше, у системах мобільного зв'язку використовується метрові і дециметрові радіохвилі, які слабо огинають перешкоди, тобто поширюються в основному по прямій, отримуючи багаторазові відбиття від навколишніх об'єктів і поверхні, що підстилає.

Багатопроменеве розповсюдження – це поширення радіохвиль від точки передавання до точки приймання одночасно декількома окремими шляхами.

Наслідком такого багатопроменевого розповсюдження є:

- більш швидке, чим у вільному просторі, загасання інтенсивності прийнятого сигналу з відстанню;
- завмирання і спотворення результуючого сигналу.

На рис. 2.2 представлена залежність напруженості поля (E) від відстані (d) між базовою (БС) і мобільною (МС) станціями.

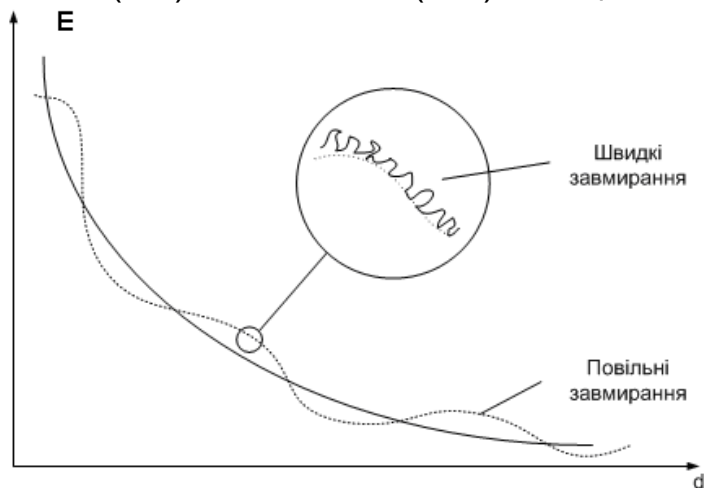


Рис. 2.2. Залежність напруженості поля від відстані між МС та БС

Видно, що по мірі видалення МС і БС напруженість поля убуває і ця залежність не є плавною. Крім того, якщо змінити частоту сигналу чи швидкість руху МС, залежність значно зміниться, але характер залишається колишнім. Зміна середнього значення напруженості поля в залежності від відстані МС і БС прийнято називати *загасанням*, а сплески - *завмиранням сигналу*.

У загальному виді *загасання* (при відсутності завад) визначається як:

$$\frac{P_{пр}}{P_{пер}} = \frac{1}{(4\pi d \cdot f / C)^2} = \frac{1}{[4\pi(\frac{d}{\lambda})]^2}$$

- де $P_{пр}$ - потужність сигналу, прийнятого МС;
- $P_{пер}$ - потужність сигналу, переданого БС;
- d - відстань МС від БС;
- f - частота сигналу;
- C - швидкість світла;
- λ - довжина хвилі сигналу.

З приведеної вище залежності видно, що *величина загасання пропорційна квадрату частоти сигналу і квадрату відстані МС від БС*. Картина багатопроменеве поширення схематично зображена на рис.2.3. (пунктиром показані відбиті від об'єктів хвилі).

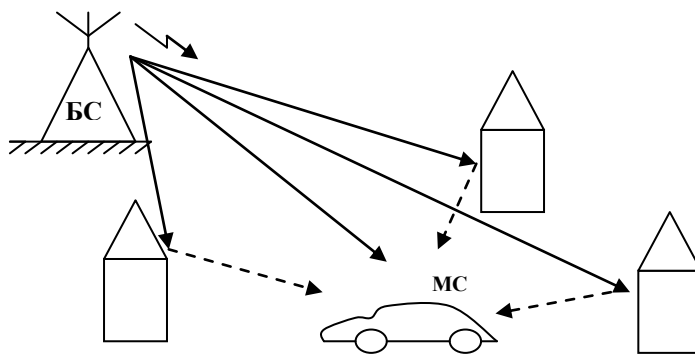


Рис. 2.3. Багатопроменеве розповсюдження в умовах міської забудови

Фактично область істотного відбиття сигналу обмежується звичайно порівняно невеликою ділянкою в околиці МС – порядку декількох сотень довжин хвиль, тобто кілька десятків чи сотень метрів. При переміщенні МС ця область переміщується разом з нею.

При додаванні декількох сигналів, що пройшли по різних шляхах та мають у місці прийому в загальному випадку різні фрази, результуючий сигнал може бути як вище за середній рівень, так і помітно нижче. Причому завмирання сигналу, які утворюються при взаємній компенсації сигналів унаслідок несприятливого сполучення їхніх фаз і амплітуд, можуть бути досить глибокими.

Спотворення результуючого сигналу (або *міжсимвольна інтерференція*) має місце в тому випадку, коли порівнянні по амплітуді і протилежні по фазі промені відрізняються по різниці ходу на час, порівнянний із тривалістю символу. Це приводить до накладення символів одного сигналу на символи сусіднього.

Коливання рівня (завмирання) прийнятого сигналу мають дві складові – *швидку* і *повільну* (рис. 2.2) .

Швидкі завмирання, що є прямим наслідком багатопроменевого розповсюдження, описуються релеєвським законом розподілу, і тому іноді називаються релеєвськими завмираннями. Ці завмирання обумовлені сигналами, відбитими від зовнішніх об'єктів (рис. 2.3).

Діапазон змін рівня сигналу при швидких завмираннях може досягати 40 дБ, з яких приблизно:

- 10 дБ - перевищення над середнім рівнем;
- 30 дБ – провали нижче середнього рівня (причому більш глибокі).

При нерухомій МС інтенсивність прийнятого сигналу також змінюється через рефракцію. При переміщенні МС періодичність флуктуацій у просторі складає біля напівхвилі, тобто порядку 10...15см у лінійній мері. Період флуктуацій у часі залежить від швидкості переміщення МС. Наприклад, при швидкості 50 км/год період флуктуацій складає близько 10 мс, а при 100 км/год – близько 5 мс. Частота завмирань глибиною 30...10 дБ при швидкості 50 км/год складає 5..50 провалів у секунду відповідно, а середня тривалість завмирань нижче рівня 30...10 дБ при тій же швидкості – порядку 0,22 мс.

Повільні завмирання виникають через зміну рельєфу, умов затінення при переміщенні МС і рефракції радіохвиль, і описуються логарифмічно нормальним законом розподілу. Інтенсивність повільних флуктуацій не перевищує 5...10дБ, а їхня періодичність відповідає переміщенню МС на десять метрів. Фактично *повільні завмирання* являють собою зміну середнього рівня сигналу при переміщенні МС і рефракції радіохвиль, на які накладаються швидкі завмирання внаслідок багатопроменевого розповсюдження.

У стільниковому зв'язку найбільш небезпечні швидкі завмирання. Тому що вони бувають досить глибокими, то відношення сигнал/шум може падати настільки сильно, що корисна інформація буде істотно спотворюватися шумами, аж до повної її втрати.

Для боротьби зі швидкими завмираннями використовують наступні методи:

- рознесений прийом (тобто одночасне використання двох чи більше приймальних та/або передавальних антен);

- сигнали з розширенням спектру.

Для боротьби зі спотворенням сигналу (міжсимвольною інтерференцією):

- у системах *CDMA* використовують широкосмугові сигнали і рейк-приймачі (найбільш сильні сигнали вирівнюються по затримці, а потім складаються);

- у системах *TDMA* (тобто у вузькосмугових системах) застосовують еквалайзери.

Крім того, для боротьби з наслідками багатопроменевого розповсюдження сигналу, а саме для усунення помилок, обумовлених як завмираннями сигналів, так і міжсимвольною інтерференцією, використовують завадостійке кодування:

- блокове і згортаюче кодування ;

- перемежування.

Рознесений прийом. Можливі наступні варіанти рознесеного прийому:

- рознесення у часі (*time diversity*) ;

- рознесення по частоті (*frequency diversity*) ;

- рознесення по куту чи по напрямку (*angle* або *direction diversity*);

- рознесення по поляризації (*polarization diversity*) ;

- рознесення в просторі (*space diversity*) .

Стрибки по частоті. Використання стрибків сигналів по частоті (*frequency hopping*) є одним із методів розширення спектру - *FHSS*. Ідея методу стрибків по частоті полягає в тому, що несуча частота кожного фізичного каналу періодично змінюється, тобто кожен фізичний канал періодично переводиться на новий частотний канал. Оскільки релеевські завмирання є частотно - селективними, то, якщо при роботі на деякій частоті мало місце завмирання, при зміні робочої частоти на 100...300 кГц завмирання з великою імовірністю не буде. Розрізняють повільні і швидкі стрибки по частоті. Останні приводять до розширення спектру. Застосування стрибків по частоті передбачено, наприклад, стандартом *GSM* (використовуються повільні стрибки з переключенням частоти в кожному черговому кадрі).

Еквалайзер - це по суті адаптивний фільтр, що налаштовується таким чином, щоб сигнал на його виході був у можливо більшому ступені очищений від міжсимвольних спотворень, які містяться у вхідному сигналі. Використовується у вузькосмугових *TDMA*-системах. Призначений для компенсації тієї різниці ходу між складовими променями при багатопроменевому поширенні, яка приводить до міжсимвольної інтерференції. За допомогою еквалайзера здійснюється створення моделі каналу і корегування сигналу. В специфікації *GSM* робота еквалайзера заснована на використанні алгоритму *VITERBI*.

3. Принципи побудови систем з множинним доступом

3.1. Використання каналів в системах з множинним доступом

В радіосистемах існують наступні методи формування групового каналу та його розподілу:

- *централізований метод;*
- *незалежний метод.*

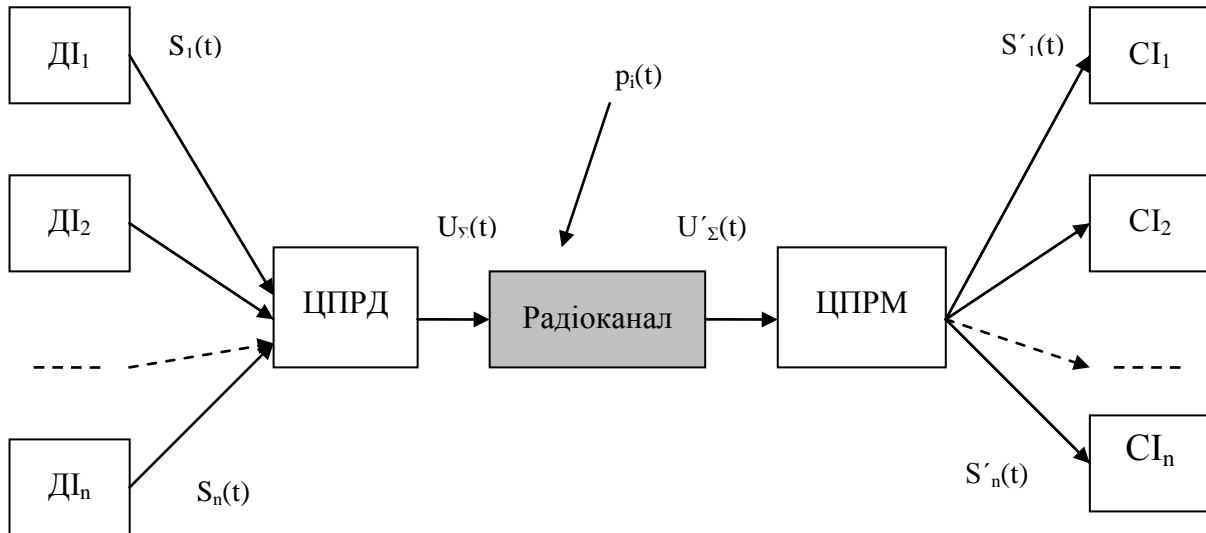


Рис.3.1. Централізований метод формування групового каналу

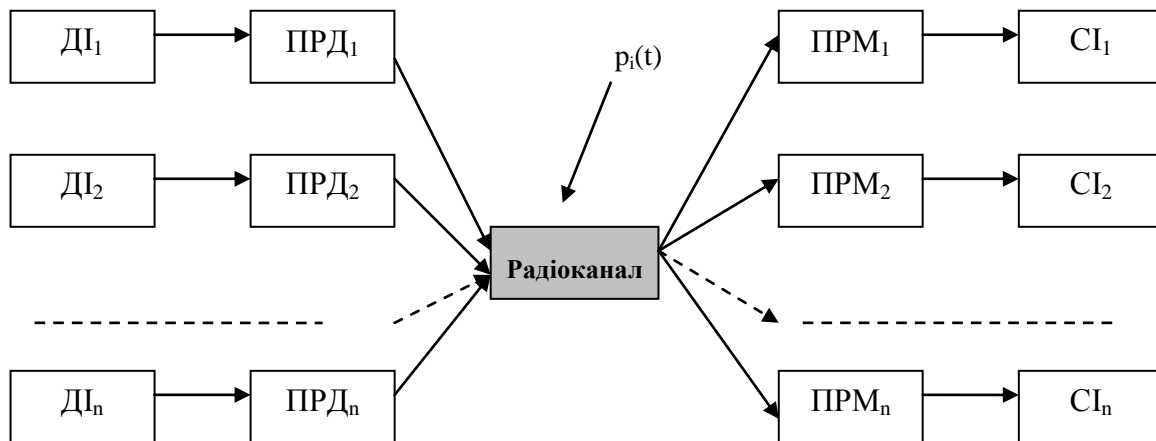


Рис.3.2. Незалежний метод формування групового каналу

- DI – джерело інформації
CI – споживач інформації
ЦПРД – центральний передавач
ЦПРМ – центральний приймач
ПРД – індивідуальний(каналний) передавач
ПРМ – індивідуальний(каналний) приймач

Перший метод застосовується тоді, коли абоненти розміщені в безпосередній близькості один від одного і груповий сигнал $U_{\Sigma}(t)$ формується в центральному передавачі (ЦПРД), з якого він поступає в

канал. Центральний приймач (ЦПРМ) забезпечує виділення повідомлень і розподілення їх між абонентами. Така система являє собою багатоканальну систему передачі інформації.

В системах з **незалежним** формуванням каналів кожному абоненту виділяється окремий передавач і приймач. Відповідно до повідомлення $S_i(t)$ від іншого абонента на виході окремого передавача ПРД формується окремий сигнал $U_i(t)$. Сигнали з виходу окремих передавачів складуються безпосередньо в середовищі (радіоканалі) розповсюдження радіохвиль. Там утворюється сумарний сигнал:

$$U_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n U_i(t) \quad (1)$$

Приймач ПРМ_i виділяє тільки той каналний сигнал, на частоту якого він настроєний. З урахуванням завад $p_i(t)$ на виході приймача формується сигнал:

$$S'_i(t) = S_i(t) + p_i(t) \quad (2)$$

Системи з незалежним формуванням каналів являють **собою систему з множинним (груповим) доступом**, які використовуються в сучасних системах мобільного радіотелефонного зв'язку загального користування великих і малих зон обслуговування.

В системах з множинним доступом всі канали (несучі частоти) або закріплюються за окремими абонентами (коли кількість абонентів $N_{аб}$ не більше числа доступних каналів V_k), або розподіляються і закріплюються за абонентами на час сеансу зв'язку (коли $N_{аб} \gg V_k$).

В першому випадку канали жорстко закріплюються за абонентами і не потребують контролю на предмет їх зайнятості, а такі системи називаються **неконтрольованими** і характеризуються низьким навантаженням на канал (близько 0,15 Ерл).

У другому випадку стан каналів постійно контролюється на предмет їх зайнятості – системи називаються **контрольованими**. Навантаження на канал в таких системах за рахунок багаторазового використання каналу значно збільшується і може досягати в годину найбільшого навантаження 0,4...0,8 Ерл.

Перевагою контрольованих систем є можливість значного збільшення абонентської ємності при незначному збільшенні робочих каналів із збереженням якості обслуговування і економічного використання частотного спектру. Але в цих системах потрібне введення складних пристроїв контролю за станом навантаження на канал і розподілення каналів між абонентами.

Абоненти багатостанційних систем радіозв'язку можуть вести обмін безпосередньо один з одним або через центральну радіостанцію (ЦРС) з автоматичним розподілом каналів, що надаються абонентам на час зв'язку. Перша система називається **некоординованою**, а друга - **координованою**.

Для **некоординованої системи** для зв'язку (симплексного) потрібна лише одна частота, яка використовується обома абонентами. Перевага: простота реалізації. Недоліки: можливість прослуховування іншими абонентами і великі взаємні завади.

Координована система використовує ЦРС, яка забезпечує контроль завантаження частотного діапазону і автоматичне керування розподілом каналів. Недолік: для симплексного зв'язку між двома абонентами потрібно дві частоти.

Практично координована система є і контрольованою, а некоординована система – неконтрольованою. В координованих контрольованих системах підвищується ефективність використання частотного простору.

Прикладом багатостанційних координованих контрольованих систем є транкінгові та стільникові системи радіозв'язку.

3.2. Методи множинного доступу

В системах радіодоступу гостро стоїть питання ефективного використання доступних ресурсів, а саме:

- виділеної смуги частот (ΔF);
- пропускну здатності мережі;
- енергетичних, матеріальних і фінансових ресурсів.

Важливу роль в цьому відіграють методи їх розподілу між абонентськими станціями, які входять у відповідну мережу.

Ефективне використання смуги частот, тобто збільшення кількості одночасно діючих абонентів при фіксованій швидкості передачі в абонентському каналі може бути реалізована за рахунок вдосконалення методів модуляції і зменшення завдяки цьому необхідної смуги частот для одного каналу. Однак існують принципіальні обмеження по зменшенню займаної смуги частот.

Абоненти багатостанційних систем сухопутного мобільного радіозв'язку мають вільний доступ до загального частотного тракту, тобто можуть передавати інформацію в той час, коли в цьому виникає необхідність.

Принцип вільного доступу в системах мобільного зв'язку реалізується наступними **методами розподілу каналів**:

- **частотним**;
- **часовим**;
- **кодовим**;
- **просторовим**;
- **комбінованим**.

Найбільше поширення одержали методи множинного доступу з частотним розподілом каналів МДЧтР (*FDMA - Frequency Division Multiplex Access*) і множинного доступу з часовим розподілом каналів МДЧсР (*TDMA - Time Division Multiple Access*).

В системах з **частотним розподілом каналів (FDMA)** кожному користувачу на весь час сеансу зв'язку виділяється окремий частотний канал - ділянка спектра частот Δf в загальній смузі частот системи (рис. 3.3). Цей метод використовується в усіх аналогових системах стільникового зв'язку та радіодоступу. Смуга частот одного каналу складає 10...30 кГц.

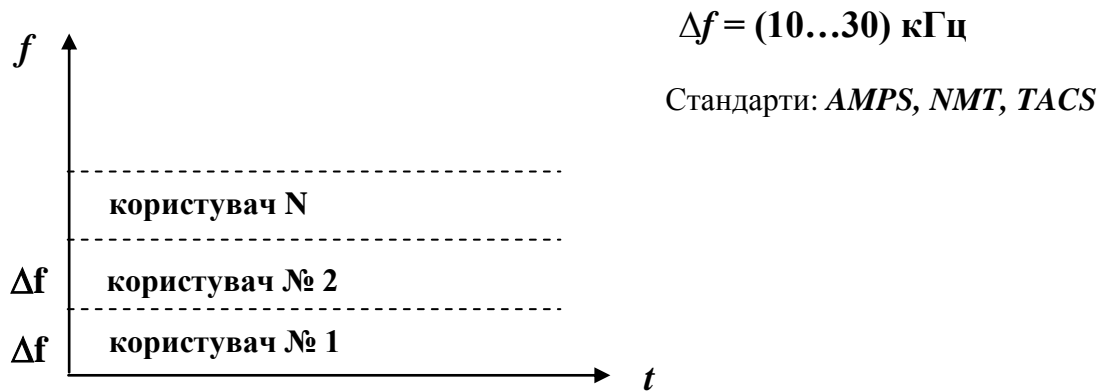


Рис. 3.3. Метод *FDMA*

Для прикладу розглянемо систему стільникового зв'язку стандарту *NMT-450*, де використовується два діапазони частот для передачі з мобільної (абонентської) на базову станцію та для передачі з базової на мобільну станцію відповідно: 453,0...457,5 МГц і 463,0...467,5 МГц.

Смуга окремого частотного каналу складає $\Delta f = 25 \text{ кГц}$ або $\Delta f = 20 \text{ кГц}$. Так як загальна смуга частот, що використовується передавачами базової і мобільної станцій дорівнює:

$$\Delta F_c = 457,5 - 453,0 = 467,5 - 463,0 = 4,5 \text{ МГц},$$

то загальна кількість каналів системи буде:

$$V_{\text{к\Omega}} = \frac{\Delta F_c}{\Delta f} = \frac{4,5 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^3} = 180,$$

а при $\Delta f = 20 \text{ кГц}$ $V_{\text{к\Omega}} = 225$ каналів.

Висновки:

- технологія *FDMA* використовується в аналогових системах радіозв'язку (першого покоління);
- системи з частотним розподілом каналів більш прості в технічній реалізації, але не забезпечують достатньої конфіденційності інформації;
- недостатньо ефективно використовується смуга частот;
- один приймач/передавач базової станції обслуговує тільки один фізичний індивідуальний канал.

В системах з **часовим розподілом каналів** (*TDMA*) кожному абоненту певна смуга частот виділяється на відповідний інтервал часу, період повторення якого погоджений зі швидкістю передачі цифрової інформації, тобто частотний канал по черзі надається декільком користувачам на визначений інтервал часу (рис. 3.4). Тривалість інтервалу часу визначається швидкістю передачі і смугою частотного радіоканалу, які використовуються. В таких системах реалізований комбінований метод розподілу каналів – частотний і часовий. Практична реалізація цього методу потребує перетворення сигналів в цифрову форму.

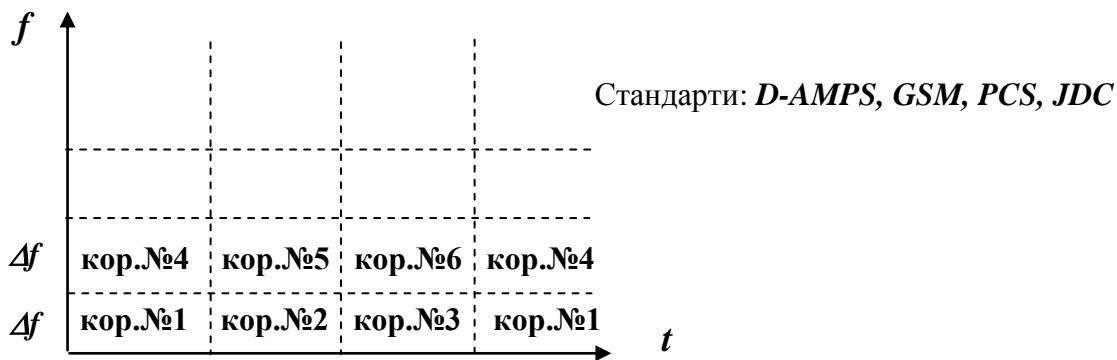


Рис. 3.4. Метод TDMA

Для прикладу розглянемо систему GSM-900, в якій виділені два дуплексні частотні діапазони для передачі/прийому (рис. 3.5):

- 890...915 МГц - для передачі від мобільної до базової станції;
- 935...960 МГц - для передачі від базової до мобільної станції.

Тобто рознесення частот передавачів і приймачів(дуплексна відстань) складає:

$$\Delta F_D = 935 - 890 = 45 \text{ (МГц)}.$$

Смуга відповідних частот передавачів сягає:

$$\Delta F_c = 915 - 890 = 960 - 935 = 25 \text{ (МГц)}.$$

Кожна з цих смуг поділена на 124 частотні канали з відстанню між каналами 200 кГц (технологія FDMA). В кожному частотному каналі за технологією TDMA формується 8 часових слотів з інтервалом часу $\tau = 0,577$ мс, період повторення яких складає 4,615 мс. По цим каналам у цифровій формі передається мова, дані або сигнали керування. Отже, загальна кількість каналів в цифровій системі стандарту GSM-900 буде $124 \cdot 8 = 992$ каналів. В залежності від очікуваного трафіку кожній базовій станції виділяється відповідна кількість несучих частот (частотних каналів).

На базовій станції досить мати один приймач і передавач в смузі 200 кГц на всі 8 каналів. Кожний з 8 каналів використовує всю доступну смугу 200 кГц.

Слід мати на увазі, що в деяких системах радіодоступу часовий розподіл використовується також і для реалізації дуплексних каналів передачі та прийому - технологія TDD.

Висновки:

- TDMA використовується в системах другого покоління (D-AMPS, GSM, PCS);
- множинний доступ до радіоканалів з часовим розподілом каналів фактично є комбінацією часового з частотним розподілом (FDMA/TDMA);
- один передавач (приймач) базової станції використовується для декількох фізичних каналів (в GSM - для 8);
- в системах радіодоступу з TDMA необхідна система чіткої синхронізації.

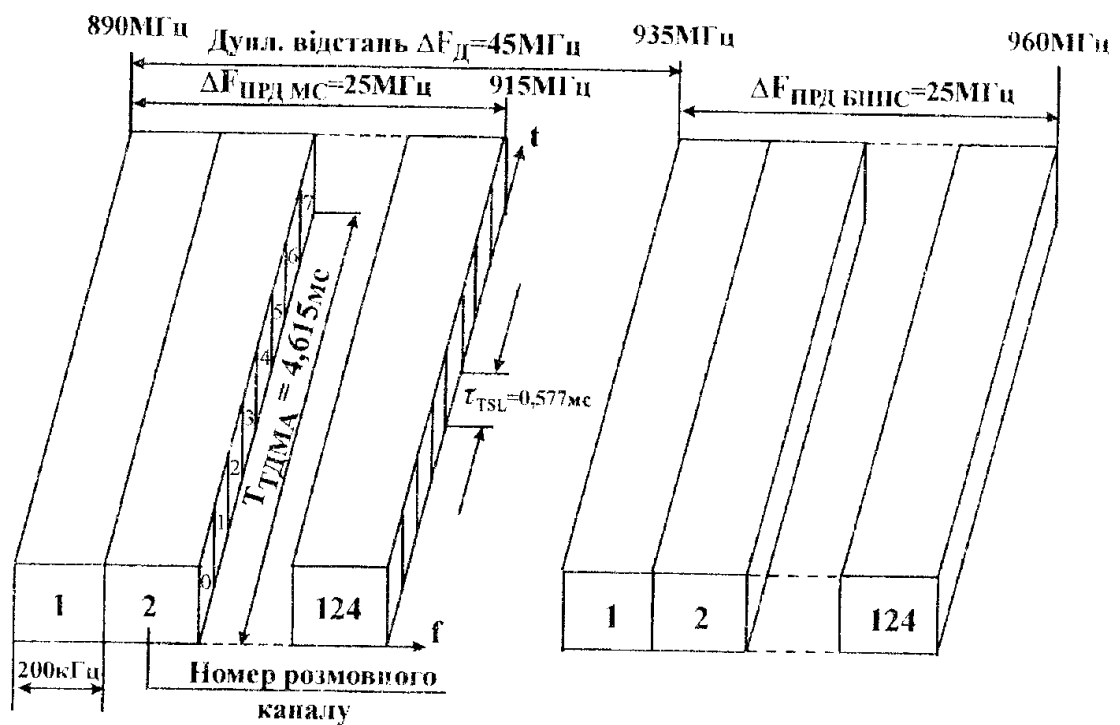


Рис. 3.5. Структура каналів стандарту GSM-900

Організація множинного доступу до радіоканалів в системі з **кодовим розподілом каналів** МДКР (*CDMA-Code Division Multiplex Excess*) передбачає, що для кожного користувача мережі виділяється весь частотний канал на весь час розмови (рис.3.6). При цьому використовуються спеціальні коди для ідентифікації з'єднань. Канали трафіку при такому способі розділення середовища створюються за допомогою застосування широкопasmового кодо-модульованого радіосигналу — шумоподібного сигналу, який передається в загальний для інших аналогічних передавачів даної системи радіодоступу канал. Кожний передавач модулює сигнал із застосуванням присвоєного користувачу окремого індивідуального числового коду. При цьому кожний біт потоку даних замінюється на відповідну кодову послідовність довжиною 11, 16, 32, 64... біт. Ці кодові послідовності унікальні для кожного передавача та підбираються таким чином, щоб кореляція двох будь-яких кодів була мінімальною. Як правило, інформаційний «0» при цьому замінюється на інверсію цього коду. При цьому в явному вигляді відсутнє часове або частотне розділення каналів. Кожний абонент **постійно** на протязі сеансу зв'язку використовує **всю ширину частотного каналу**, передаючи сигнал в загальний частотний канал, і приймаючи сигнал із загального частотного каналу.

Смуга частот одного каналу дуже широка, віщання абонентів накладається один на одного, але, оскільки їх коди модуляції сигналу відрізняються, то вони можуть бути диференційовані апаратно-програмними засобами приймача. Приймач, який налаштований на аналогічний код, може відокремлювати із загального радіосигналу ту частину сигналу, яка призначена саме даному приймачу.

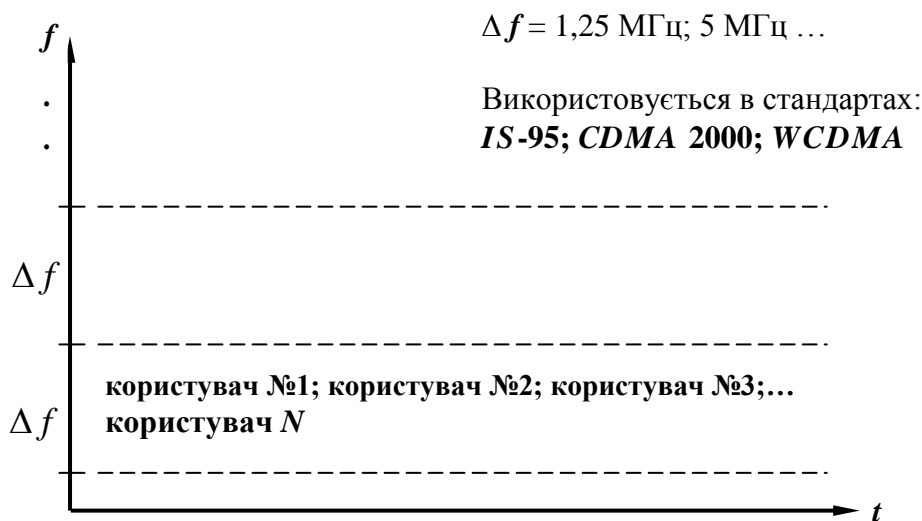


Рис. 3.6. Метод CDMA

Технологія *CDMA* передбачає використання широкосмугових сигналів, для отримання яких *CDMA* застосовує технологію *DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)*.

Принцип роботи систем з кодовим поділом каналів можна пояснити на наступному прикладі. Припустимо, що ви знаходитесь в деякому приміщенні, в якому люди розмовляють різними мовами. Одна пара розмовляє між собою англійською мовою, інша українською, третя німецькою. Виходить так, що всі розмовляють одночасно в одному діапазоні частот (мова від 0,3 кГц до 5 кГц). При цьому ви, розмовляючи зі своїм опонентом, розумієте тільки його, але чуєте всіх, тобто француз розуміє тільки француза, німець - тільки німця, а інша інформація не враховується. Мова спілкування в даний момент є кодом. Так само й в стандарті *CDMA*, передана в ефір інформація від базової станції до мобільної попадає до всіх абонентів цієї мережі, але кожен абонент на виході абонентського терміналу отримує тільки ту інформацію, що призначена для нього. В *CDMA* це організовано за рахунок застосування кодування переданих даних відповідними кодами.

Таким чином, використовуючи різні псевдовипадкові послідовності (коди) можна організувати декілька незалежних каналів передачі даних в одній і тій же смузі частот.

Потрібно сказати що вищенаведений опис технології *CDMA* сильно спрощено, хоча дає деяке представлення про те, як це працює.

Прикладом є система *CDMAone* (стандарт *IS-95*) фірми *Qualcomm*, яка розрахована на роботу в діапазоні частот 800 МГц і використовує метод прямого розширення спектра на основі із застосуванням кодових послідовностей 64-го порядку, сформованих за законом функцій Уолша.

Найбільше розповсюдження набули наступні стандарти із технологією *CDMA*:

- *CDMAone (IS-95)* (в діапазоні 800 МГц);
- *CDMA PCS* (в діапазоні 1900 МГц);
- *CDMA2000* (в діапазоні 800 МГц);
- *WCDMA* (в діапазоні 2100 МГц).

Висновки:

- метод кодового розподілення має високу конфіденційність та захищеність від зосереджених по частоті завад;
- серед недоліків - велика складність передавальної і особливо приймальної апаратури, необхідність постійного контролю та регулювання рівнів передачі для зменшення взаємних завад.

Багатостанційний доступ з просторовим розподіленням передбачає роботу безпроводових пристроїв тільки в границях визначеної обмеженої території. Це можливо забезпечити зменшенням потужності передавача пристрою. Даний метод в комбінації з іншими зайшов застосування в стільникових системах зв'язку, а саме, у частотно-територіальному принципі розподілу частотних каналів мережі та технології **MIMO** (з англ. *Multiple Input Multiple Output*), яка передбачає передачу даних по радіоканалу із застосуванням декількох передавальних та приймальних антен.

Комбінація методів кодового та частотного розподілу каналів була реалізована у багатостанційному доступі з ортогональним частотним розподілом каналів - **OFDMA** (з англ. *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*), який застосовується у радіотехнологіях *WiMAX* та *LTE*.

3.3. Розподіл дуплексних каналів

В дуплексних системах радіозв'язку для передачі і прийому сигналів використовуються окремі фізичні канали, які рознесені по частоті (*FDD*) або у часі (*TDD*). Крім того, можливий *кодовий* (*CDD*), просторовий (*SDD*) і *поляризаційний* (*PDD*) розподіл.

При часовому розподілу (*TDD*) в любий момент часу передача даних ведеться тільки в одному напрямку з використанням одного частотного каналу, а направлення передачі чергується. Технологія *TDD* дозволяє передавати і приймати сигнали на одній і тій же несучій частоті, але в різні моменти часу. Безпроводова схема *TDD*, як правило, використовується у поєднанні з технологією *TDMA*.

Для того, щоб за допомогою *TDD* отримати необхідну для абонента швидкість передачі даних, потік даних спочатку розподіляється передавачем на сегменти, які ущільнюються у часі до більш високих швидкостей передачі даних і передаються у вигляді пакетів, а приймаюча сторона потім відновлює вихідну швидкість передачі даних. Між передачею пакетів в протилежних напрямках є захисний інтервал, який необхідний для запобігання накладання сигналів. Тому, реальна швидкість передачі даних в каналі повинна бути більш ніж в два рази вище швидкості передачі даних, які потребують АС і БС.

Часове розділення дуплексного каналу має дві важливі переваги відносно систем *TDMA* з двома різними несучими частотами по одній на кожний напрямок (*TDMA/FDD*):

- можливість усунення завмирань;
- можливість динамічного розподілу пропускної спроможності (контролер системи динамічно розподіляє слоти *TDMA* в кожному

напрямку, що дозволяє при необхідності прямому каналу від БС до АС надавати більше число часових слотів).

Розподіл дуплексних каналів за рахунок рознесення по частоті (*FDD*) передбачає виділення для передачі і прийому окремих частотних смуг із відповідним частотним рознесенням. Значення рознесення по частоті – дуплексне рознесення визначається у відповідних рекомендаціях МСЕ-Р і специфікаціях обладнання.

TDD знаходить застосування в безпроводових телефонах, а в стільниковому зв'язку звичайно використовується дуплексний розподіл по частоті (*FDD*).

4. Модуляція сигналу в системах рухомого зв'язку

4.1. Класифікація методів модуляції в системах радіодоступу.

Сучасні системи радіодоступу для передачі інформації використовують широкий спектр аналогових і цифрових методів модуляції.

В загальному випадку модульований сигнал може бути представлений у вигляді наступної функціональної залежності:

$$U_s(t) = f(t, A, \omega, \varphi, T, \tau),$$

де один або декілька параметрів сигналу змінюються згідно із законом первинного сигналу $S(t)$, що передається. Варіанти класифікації методів модуляції, що використовуються в системах радіодоступу, наведені на рис. 4.1.

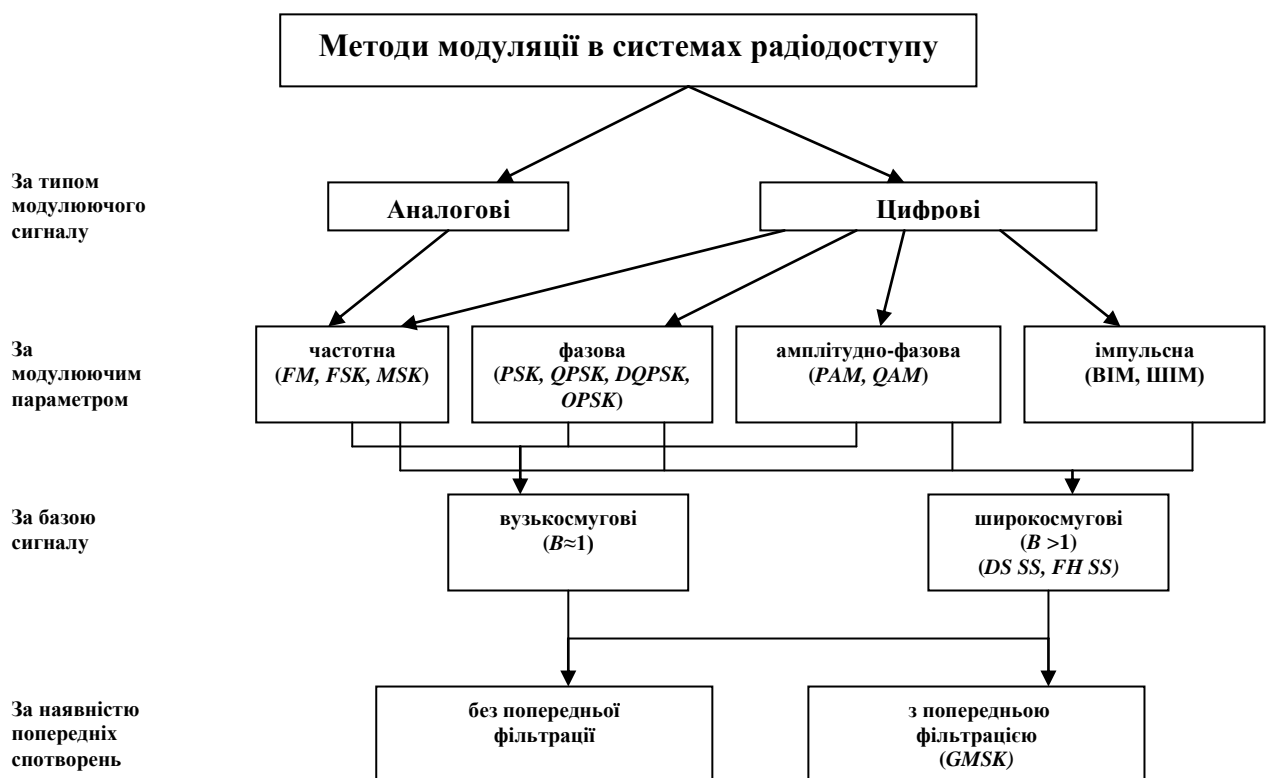


Рис. 4.1. Методи модуляції в системах радіодоступу

Як відомо, існують три основні види модуляції:

- амплітудна модуляція – АМ (AM);
 - частотна модуляція – ЧМ (FM)
 - фазова модуляція – ФМ (PM).
- } кутова модуляція

В аналогових системах рухомого зв'язку в діапазонах метрових і дециметрових хвиль ($f > 30$ МГц) використовується частотна модуляція (FM).

В цифрових системах радіодоступу (табл.4.1) фігурують такі назви, як квадратурна фазова маніпуляція (Quadrature Phase Shift Keying - QPSK), мінімальна маніпуляція (Minimum Shift Keying - MSK) та інші. Насправді це є різновидом кутової модуляції (ФМ і ЧМ). Англійський же термін "SK - Shift Keying" позначає маніпуляцію, що у буквальному

перекладі означає «переключення стрибком», тобто дискретне переключення.

Таблиця 4.1

Стандарти систем радіодоступу	<i>GSM</i>	<i>D-AMPS</i>	<i>Tetra</i>	<i>CDMA</i>
Метод доступу	<i>TDMA</i>	<i>TDMA</i>	<i>TDMA</i>	<i>CDMA</i>
Вид модуляції	0,3GMSK	$\pi/4$ DQPSK	$\pi/4$ DQPSK	QPSK

Основним завданням використання спектрально ефективних методів модуляції є підвищення ефективності використання смуги частот. Збільшення попиту на цифрові канали передачі призвели до дослідження спектрально ефективних методів модуляції, направлених на максимально ефективне використання смуги частот і, відповідно, покликані послабити спектральне перенавантаження каналів зв'язку.

В апаратурі цифрового радіодоступу велике поширення одержали:

- диференційна квадратурна фазова маніпуляція зі зсувом $\pi/4$ ($\pi/4$ DQPSK);
- мінімальна маніпуляція (MSK).

4.2. Диференційна квадратурна фазова маніпуляція зі зсувом $\pi/4$ ($\pi/4$ DQPSK)

Будь-який вузькосмуговий високочастотний радіосигнал можна представити наступним виразом:

$$S(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_k(t)],$$

де під впливом модулюючого первинного сигналу змінюються значення $A(t)$ або $\varphi_k(t)$ (при цьому один з параметрів може бути незмінним).

Використовуючи тригонометричні співвідношення (при $A(t) = \text{const} = a$), отримуємо:

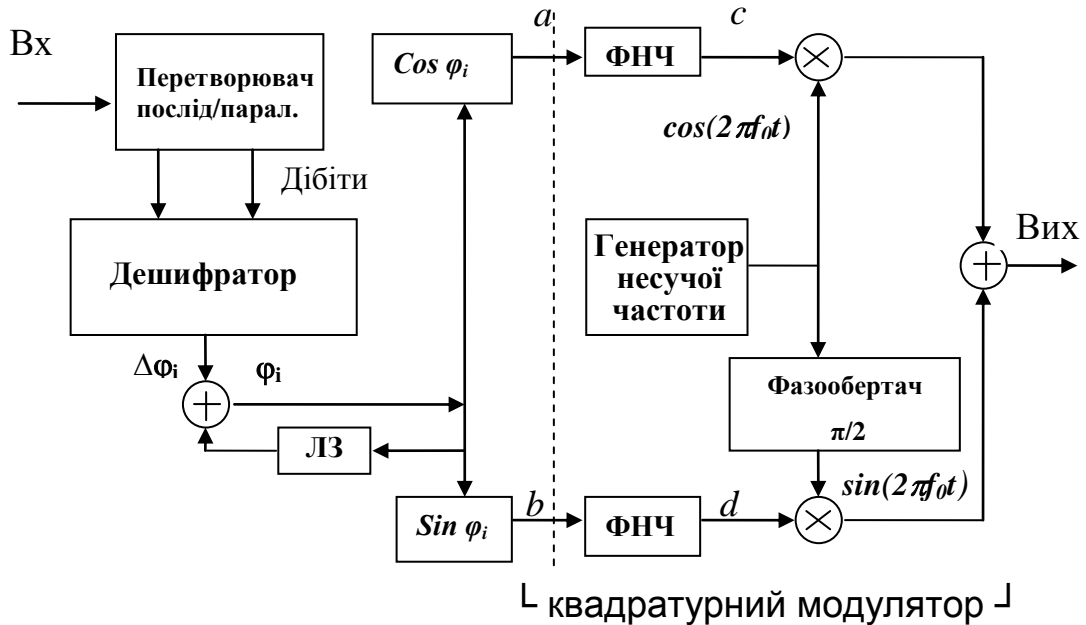
$$S'(t) = a \cos[\omega_0 t + \varphi_k(t)] = a \cos \varphi_k(t) \cos \omega_0 t - a \sin \varphi_k(t) \sin \omega_0 t.$$

Подивимося, як це реалізується у модуляторі $\pi/4$ DQPSK, функціональна схема якого представлена на рис. 4.2. Формування сигналу відбувається в кілька етапів. На першому етапі біти цифрового сигналу, що надходять на вхід модулятора поєднуються попарно в так називані дібіти. У кожному i -му дібіті в дешифраторі ставиться у відповідність приріст фазового кута $\Delta\varphi_i$. Така процедура знижує швидкість цифрового потоку в радіоканалі в 2 рази тому, що два інформаційних біти кодуються одним значенням фазового кута. Залежність між дібітом і приростом фазового кута приведена в таблиці 4.2.

Приріст фазового кута в дешифраторі

Таблиця 4.2.

Дібіти	Приріст фазового кута
00	$+\pi/4(45^\circ)$
01	$+3\pi/4(135^\circ)$
10	$-\pi/4(-45^\circ; 225^\circ)$
11	$-3\pi/4(-135^\circ; 315^\circ)$



ЛЗ – лінія затримки на час T .

Рис. 4.2. Структурна схема $\pi/4$ DQPSK модулятора.

Потім у накопичувальному суматорі, що складається з лінії затримки на тривалість дібіта і суматора, відбувається підсумовування змін фази, у результаті чого формується фаза сигналу φ_i :

$$\varphi_i = \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}$$

На наступному етапі у функціональних перетворювачах обчислюються квадратурні компоненти комплексної огибаючої сигналу:

$I_{si} = \cos(\varphi_i)$ – синфазний компонент;

$Q_{si} = \sin(\varphi_i)$ – квадратурний компонент.

Сформований сигнал у точках a і b структурної схеми має вигляд послідовності дельта-функції з обмеженим набором нормованих значень амплітуди : $0, \pm 1/\sqrt{2}, \pm 1$. Імпульсний сигнал надходить на формуючі фільтри ФНЧ. Ці фільтри призначені для формування спектру радіосигналу і визначеної форми його комплексної огибаючої. Їхні характеристики відповідають визначеним вимогам. На виході ФНЧ квадратурні компоненти здобувають згладжений вигляд, що відповідає імпульсному характеру фільтрів. Згладжені квадратурні компоненти представимо в наступному вигляді:

$I_{si}(t) = A_c(t)\cos\varphi_i$,
 $Q_{si}(t) = A_s(t)\sin\varphi_i$,
 де $A_c(t)$, $A_s(t)$ – амплітуди компонент.

На рис. 4.3. діаграми c і d (відповідно огинаючі діаграм a і b) показують приблизну форму квадратурних компонентів без обліку затримки сигналу у ФНЧ. Однак принциповим є те, що ці компоненти плавно міняються на інтервалі дібіта.

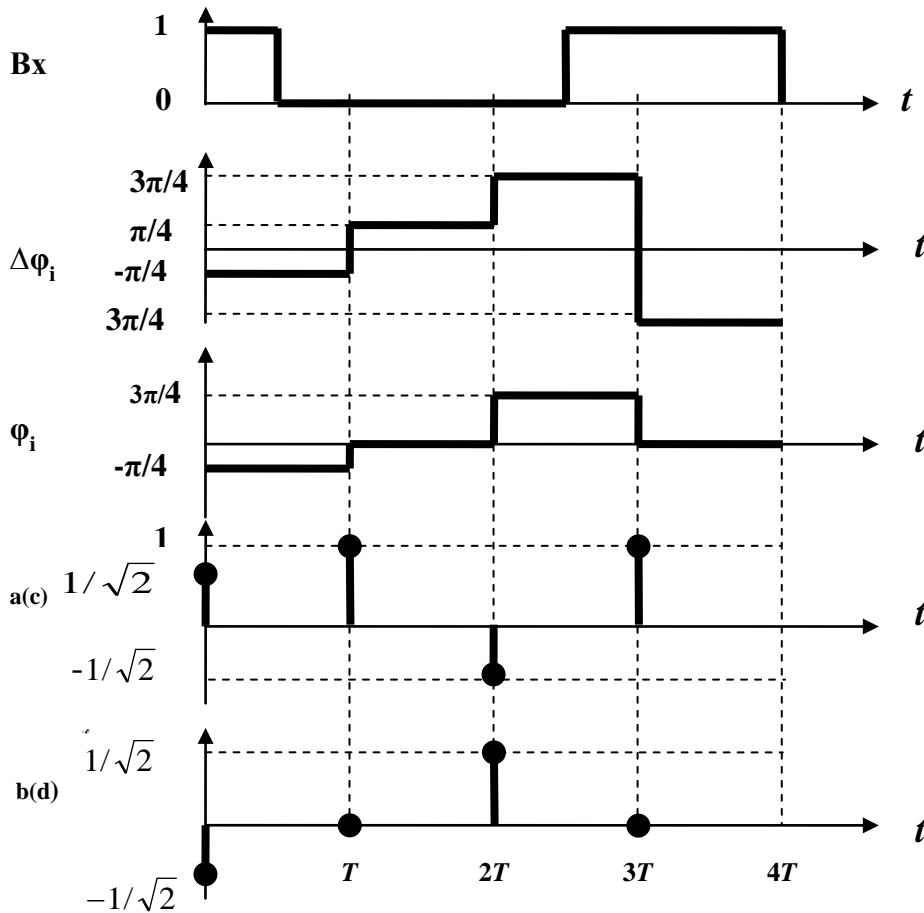


Рис. 4.3. Формування сигналів в окремих точках модулятора

Генератор і фазообертач формують квадратурні колювання несучої або проміжної частоти f_0 . Після попарного перемножування квадратурних компонент і підсумовування, одержимо $\pi/4$ DQPSK сигнал. Математично ці операції можна представити у наступному вигляді:

$$S(t) = A_c(t)\cos\varphi_i(t)\cos(2\pi f_0 t) + A_s(t)\sin\varphi_i(t)\sin(2\pi f_0 t) = A(t)\cos[(2\pi f_0 t) - \varphi_i(t)],$$

де $A(t)$ - огинаюча сигналу;

$$\varphi_i(t) = \arctg\left\{\frac{A_s(t)}{A_c(t)}\operatorname{tg}[\varphi_i(t)]\right\} - \text{фаза сигналу}$$

Сформований сигнал $S(t)$, при необхідності, переноситься на несучу частоту, підсилюється і випромінюється в ефір.

Відзначимо ще одну важливу особливість модуляції $\pi/4$ DQPSK. Як було показано вище, обробка кожного дібіта пов'язана з плавною зміною

фази сигналу. А, як відомо, швидкість зміни фази можна розглядати як частотну модуляцію.

При $\pi/4$ DQPSK модуляції можливі дві швидкості зміни фази:

- велика - при обробці дібітів, що вимагає зміни фази на $3\pi/4$;
- менша - при зміні фази на $\pi/4$.

Значення девіації частоти можна визначити з вираження:

$$\Delta f_{\partial} = \frac{\Delta \varphi_i}{2\pi T}$$

де T – тривалість дібіта.

Підставимо відоме значення: $T = 1/32$ кГц, $\Delta\varphi_1 = 3\pi/4$, $\Delta\varphi_2 = \pi/4$. Одержимо $\Delta f_{d1} = 12$ кГц, $\Delta f_{d2} = 4$ кГц. Звідси випливає, що при передачі цифрового сигналу з тактовою частотою 32 кГц випромінюються частоти на ± 12 кГц і ± 4 кГц вище і нижче несучі частоти f_0 . Таким чином, $\pi/4$ DQPSK модуляцію можна розглядати як різноманітність 4-х-рівневої частотної маніпуляції.

Різниця між схемами модуляції OQPSK (Offset QPSK - квадратурна фазова маніпуляція зі зміщенням) і QPSK полягає в орієнтації двох модульованих сигналів. В звичайній QPSK потоки парних і непарних імпульсів передаються зі швидкістю $1/(2T)$ біт/с, причому вони синхронізовані так, що їх переходи співпадають. В OQPSK, яку інколи називають SQPSK (staggered QPSK), використовується також поділ потоку даних і ортогональна передача. Різниця в тому, що ці потоки синхронізовані зі зсувом на T .

Головна перевага OQPSK перед QPSK – усунення позасмугової інтерференції, дозволила додатково покращити формат OQPSK, усунувши розриви при переході фази. Це стало мотивацією розробки схем модуляції без розриву фази (continuous phase modulation – CPM). Однією із таких схем є маніпуляція з мінімальним зсувом (minimum shift keying – MSK). MSK можна розглядати як частковий випадок частотної маніпуляції без розриву фази або частковий випадок OQPSK із синусоїдальним порівнянням символів.

4.3. Маніпуляція з мінімальним зсувом (MSK).

У системах радіодоступу також використовується гаусівська маніпуляція з мінімальним зсувом (Gaussian Minimum Shift Keying - GMSK). Цей метод являє собою частотну маніпуляцію, при якій несуча частота дискретно – через інтервали часу, кратні періоду T бітової модулюючої послідовності – приймає значення:

$$f_n = f_0 - F/4 \text{ чи } f_s = f_0 + F/4,$$

де f_0 – центральна частота (несуча) частотного каналу, який використовується;

$F = 1/T$ – частота бітової послідовності, яка представлена у розмірності біт/с.

Рознесення частот $\Delta f = (f_s - f_n) = F/2$ - мінімально можливе, при якому забезпечується ортогональність коливань частот f_n і f_s на інтервалі тривалості T одного біта. При цьому за час T між коливаннями

частот f_H і f_B набігає різниця фаз, рівна $\pi/2$. Таким чином, термін “мінімальний зсув” у назві методу маніпуляції відноситься у зазначеному вище змісті до зсуву частот.

Наприклад, якщо швидкість передачі складає 2400 біт/с, то мінімально можливим рознесенням частот може бути значення $\Delta f = (F/2) = 1200$ Гц.

Термін “гаусівська” у назві методу маніпуляції відповідає додатковій фільтрації бітової послідовності, що модулює, відносно вузькосмугового гаусівського фільтру. Саме ця фільтрація відрізняє метод *GMSK* від *MSK*.

Метод *MSK* іноді розглядають як метод квадратурної фазової маніпуляції зі зсувом (*OQPSK*), але із заміною прямокутних модулюючих імпульсів тривалістю $2T$ напівхвильовими відрізками синусоїд або косинусоїд ($\cos \pi t/2T$). При цьому результуючий сигнал можна записати як:

$$s(t) = d_I(t) \cos \frac{\pi t}{2T} \cos 2\pi f_0 t - d_Q(t) \sin \frac{\pi t}{2T} \sin 2\pi f_0 t$$

Тут $d_I(t)$ і $d_Q(t)$ мають такий же зміст синфазного і квадратурного потоків даних. Схема *MSK*, яка записана у цій формі, інколи називається ***MSK з попереднім кодуванням***. Графічне представлення цього рівняння подано на рис. 4.4.

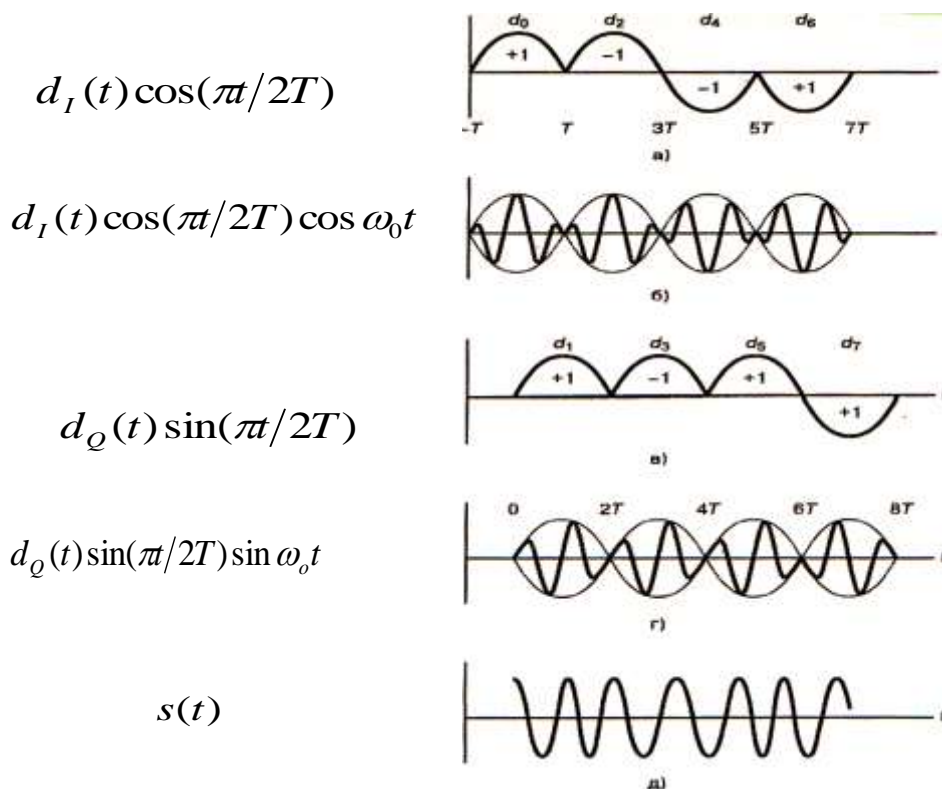


Рис. 4.4. Маніпуляція з мінімальним зсувом:

- а) модифікований синфазний потік бітів;
- б) множення синфазного потоку на несучу;
- в) модифікований квадратурний потік бітів;
- г) множення квадратурного потоку на несучу;
- д) сигнал *MSK*

На рис. 4.4а і 4.4в представлені імпульси синфазного та квадратурного каналів. На рис. 4.4б і 4.4є показана модуляція ортогональних компонентів $\cos 2\pi f_0 t$ і $\sin 2\pi f_0 t$ синусоїдальними потоками даних. На рис. 4.4д зображено суму ортогональних компонентів (рис. 4.4б та 4.4є). Кінцевий модульований сигнал отримується як результат перемноження модулюючих сигналів квадратурних каналів із відповідними несучими $\sin(\omega_0 t)$ і $\cos(\omega_0 t)$ та додаванням отриманих добутків. Описаний принцип побудови модулятора *MSK* пояснюється наступною блок-схемою (рис.4.5).

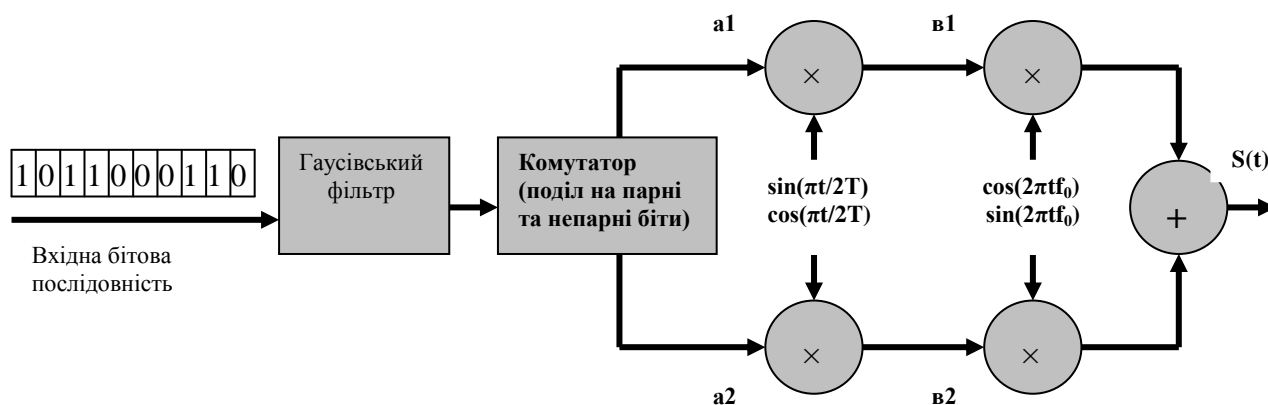


Рис. 4.5. Блок-схема модулятора *MSK*

З наведених вище аналітичних виразів безпосередньо випливає, що початкова фаза φ_H модульованого сигналу в методі *MSK* описується лінійно-ламаною кривою, тобто залежність $\varphi_H(t)$ є неперервною, але і не гладкою. Додавання гаусівського фільтра, тобто фільтра низьких частот із амплітудною характеристикою в формі гаусівської кривої, приводить до згладження кривої в точках зламу. Ширина смуги B фільтра по рівню 3 дБ обирається рівною:

$$B = 0,3F,$$

тобто добуток

$$B \cdot T = 0,3.$$

Приклад: в стандарті *GSM* $F = 270,833$ кГц, смуга гаусівського фільтра дорівнює $B = 81,3$ кГц.

Отже, можливо зробити наступні **висновки**:

- 1) сигнал *MSK* $s(t)$ має постійну огинаючу;
- 2) фаза несучої неперервна при бітових переходах;
- 3) сигнал *MSK* $s(t)$ можна розглядати як частковий випадок модуляції *FSK* із частотами передачі $(f_0 + 1/4T)$ і $(f_0 - 1/4T)$.

Таким чином, **мінімальне рознесення частот**, необхідне при модуляції *MSK*, можна записати наступним чином:

$$\left(f_0 + \frac{1}{4T}\right) - \left(f_0 - \frac{1}{4T}\right) = \frac{1}{2T},$$

що дорівнює половині швидкості передачі бітів. Відмітимо, що рознесення частоти, необхідне для *MSK* - це половина ($1/T$) рознесення, необхідного при некогерентному детектуванні *FSK* - модульованих сигналів.

Введення гаусівського фільтра приводить до звуження головної пелюстки і зниження бічних пелюсток спектру на виході модулятора, чим забезпечується допустимий рівень завад по суміжних частотних каналах.

На закінчення відзначимо, що методи модуляції $\pi/4$ *DQPSK* і *GMSK* виявляються практично одноковими по частоті помилки (*BER*), хоча перший з них забезпечує дещо більш високу ефективність використання смуги частот із розрахунку на 1 біт інформації, що передається.

4.4. Мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів (*OFDM*)

OFDM (англ. *Orthogonal frequency-division multiplexing* – мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів) є цифровою схемою модуляції з використанням великої кількості близько розташованих ортогональних піднесучих частот.

Високошвидкісний послідовний потік даних перетворюється в декілька паралельних потоків меншої швидкості, кожний з яких модулюється своєю окремою несучою. Усі ці паралельні потоки даних передаються одночасно. Група несучих частот, яка в цей момент часу переносить біти паралельних цифрових потоків, називається "символом *OFDM*".

Кожна піднесуча *OFDM*-сигналу модулюється за звичайною схемою модуляції (наприклад, квадратурною амплітудною модуляцією) на низькій символній швидкості, зберігаючи загальну швидкість передачі даних, як і у звичайних схем модуляції однієї несучої в тій же смузі пропускання. На практиці сигнали *OFDM* утворюються шляхом використання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ, англ. FFT). Спрощені структури приймача та передавача сигналів *OFDM* зображені на рис. 4.7 та 4.8.

Основною перевагою модуляції *OFDM* у порівнянні зі схемою з однієї несучої є її здатність протистояти складним умовам поширення сигналу в радіоканалі. Наприклад, боротися із загасанням в області високих частот у довгих мідних провідниках, із вузькосмуговими перешкодами та частотно-вибірковим загасанням сигналу, яке є наслідком багатопроменевого розповсюдження, без використання складних фільтрів-еквалайзерів.

Низька символна швидкість уможливорює використання захисного інтервалу між символами, що дозволяє боротися з часовим розсіюванням і усувати міжсимвольну інтерференцію (англ. *ISI* – *inter-symbol interference*).

Частотне рознесення (Δf) між сусідніми несучими $f_1, f_2 \dots f_n$ у груповому спектрі сигналу (рис.4.6) вибирається з умови можливості виділення в демодуляторі індивідуальних несучих. Ортогональність

несучих вимагає, щоб інтервал $\Delta f = k/T_U$, де T_U – тривалість корисного символу, а k – позитивне число, яке, як правило, дорівнює 1. При N Несучих сумарна смуга частот сигналу буде дорівнювати $B \approx N \cdot \Delta f$ (Гц).

OFDM характеризується значним перекриттям спектрів сигналів сусідніх піднесучих, що дозволяє зменшити у двічі значення частотного рознесення та в стільки ж раз підвищити щільність передачі цифрової інформації (біт/с)/Гц. Завдяки того, що несучі частоти є ортогональними відбувається компенсація перехресних перешкод від сусідніх каналів, незважаючи на те, що їх бічні смуги взаємно перекриваються.

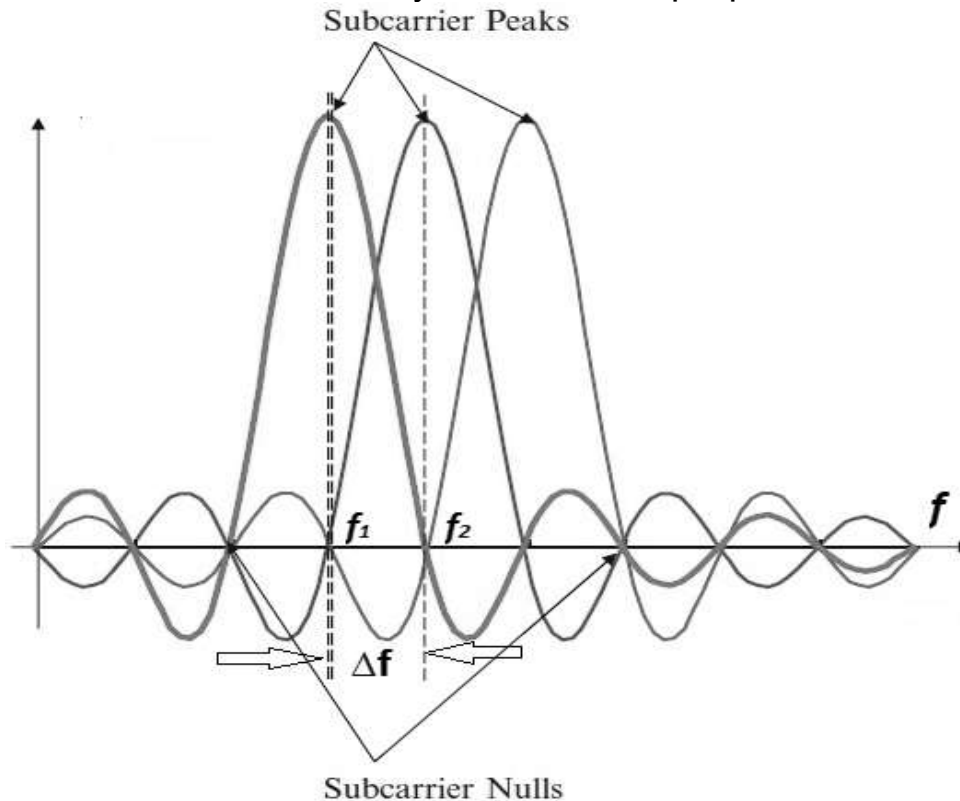


Рис.4.6. Приклад спектра *OFDM*-сигналу.

Різновидом технології є метод *COFDM* (комбінація каналного кодування і *OFDM*), який добре відомий та широко використовується в цифрових системах телерадіомовлення.

Модуляція *OFDM* використовується в технології багатостанційного доступу *OFDMA* (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), яка знайшла використання в системах мобільного і фіксованого широкосмугового безпроводного доступу. Метод *OFDMA* дозволяє одержати більшу гнучкість при керуванні різними користувацькими пристроями з різними типами антен. Він зменшує взаємні перешкоди для пристроїв із всенаправленими антенами і поліпшує приймання в умовах непрямой видимості, що досить суттєво для мобільних користувачів. Підканали можуть бути розподілені між різними абонентами залежно від умов передачі та необхідної пропускної здатності. Цим досягається більш ефективне використання ресурсів. При застосуванні *OFDM* пристрій передає дані, використовуючи весь набір піднесучих, а *OFDMA* підтримує множинний доступ, за допомогою якого передача ведеться тільки на піднесучих виділеного користувачеві підканалу. *OFDMA* відрізняється високою спектральною ефективністю – 4 біт/секунду/1 Гц

смуги. Використовуються наступні методи адаптивної модуляції – *QPSK*, *16QAM*, *64QAM* та ін. Ширина каналу варіюється від 1,25 МГц до 20 МГц. Технологія стійка до багатопроміневості та інтерференції, підтримує роботу з "інтелектуальними" антенами: *AAS*, *MIMO* та інші, а також *HARQ*. Вона призначена, насамперед, для використання в системах зв'язку *WIMAX* (*IEEE 802.16*), дозволяючи досягати високих швидкостей передачі (до 75 Мбіт/с в обох напрямках).

Торговельна марка *OFDMA* зареєстрована компанією *Runcot* (Ізраїль), що також є розробником відповідного чіпсету, який використовується для створення абонентських пристроїв і базових станцій *WIMAX*.

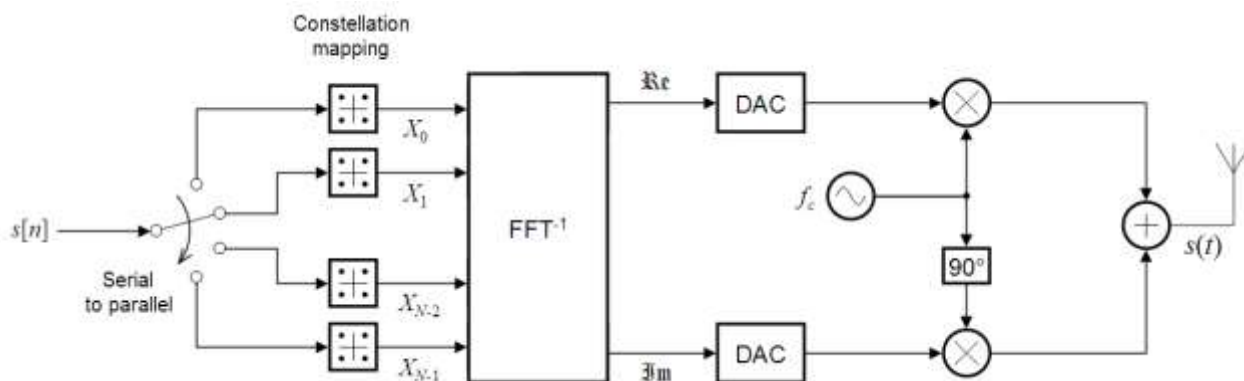


Рис.4.7. Спрощена структура передавача OFDM

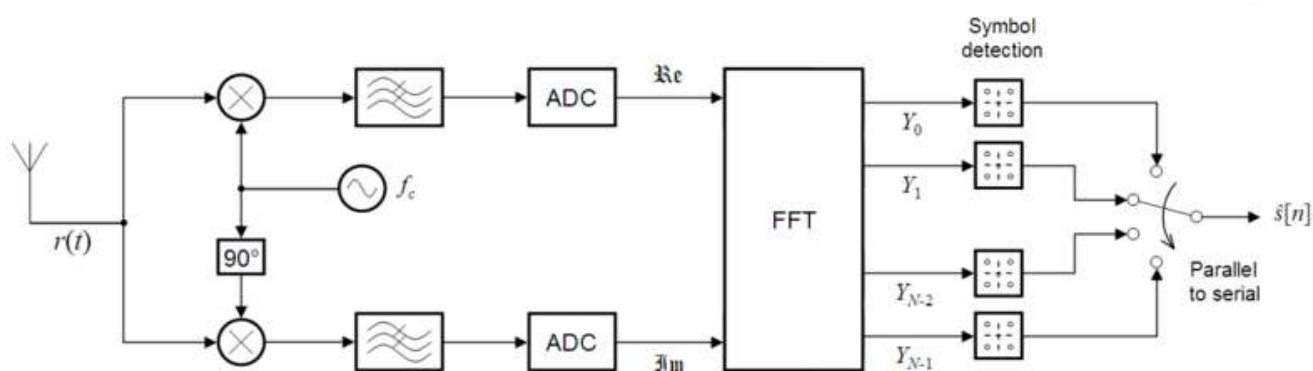


Рис.4.8. Спрощена структура приймача OFDM

5. Сигнали з розширеним спектром

5.1. Загальні положення.

В сучасних радіотехнологіях важливу роль відіграють **сигнали з розширеним спектром**, які займають значно більшу смугу частот, ніж потрібна для передачі інформаційних символів. Такі сигнали називаються сигналами з великою базою:

$$B = \Delta F \cdot \tau \gg 1,$$

де ΔF – смуга частот, яку займає сигнал;

τ – тривалість інформаційного символу.

До основних переваг таких сигналів можна віднести наступне:

- висока завадостійкість;
- можливість боротьби із завмираннями;
- несприйнятливість до різних типів шумів, до селективних по частоті завад, а також спотворень, які виникають завдяки багатопроменевому розповсюдження;
- висока конфіденційність.

Спочатку даний метод створювався з розвідувальною та військовою метою. Основна ідея методу полягає в тому, щоб розподілити інформаційний сигнал по широкій смузі радіодіапазону для ускладнення його перехоплення і придушення. Сигнали з розширеним спектром знайшли призначення в стільникових системах на основі технології *CDMA*, в безпроводових системах передачі даних тощо.

Існує наступні методи розширення спектру сигналу:

- передача сигналу із стрибкоподібною перебудовою частоти (*FHSS—frequency hopping spread spectrum*);
- розширення спектру методом прямої послідовності (*DSSS—direct sequence spread spectrum*);
- передача сигналу із стрибкоподібною перебудовою часових інтервалів (*THSS*);
- комбіновані.

Найбільше застосування в системах радіодоступу знайшли *DSSS* та *FHSS*.

5.2. Розширений спектр із стрибкоподібною перебудовою частоти (*FHSS*)

В даних сигналах передача проводиться за допомогою певних наборів несучих частот (частотних каналів) у виділеному діапазоні ΔF . Перебудова частоти сигналу відбувається через певні інтервали часу (T_f). Зміна робочих частот приймача синхронізується з передавачем, що дозволяє відновити початковий сигнал. Намагання створити заваду на одній із частот приведе до пошкодження тільки декількох бітів сигналу.

Розрізняють *повільну* і *швидку* перебудову частоти (рис. 5.1).

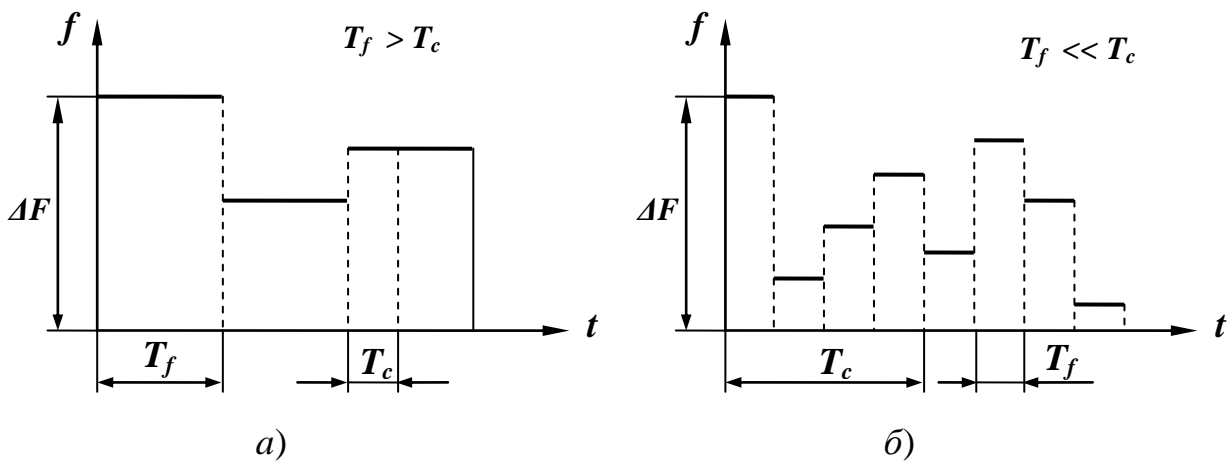


Рис. 5.1. Структура сигналу FHSS з перебудовою частоти: а – повільна; б – швидка.

T_f – тривалість передачі даних на одній несучій (одному частотному каналі),
 T_c – тривалість символу інформаційної послідовності.

Для передачі FH – сигналу резервується певна кількість частотних каналів. Відстань між несучими частотами (а отже, ширина кожного каналу) звичайно дорівнює ширині смуги вхідного сигналу. При передачі кожний канал використовується протягом фіксованого інтервалу часу (наприклад, в стандарті IEEE 802.11, цей інтервал дорівнює 300 мс). Протягом такого інтервалу проводиться передача деякої кількості бітів (можливо, частини 1 біта). Послідовність використання каналів задається кодом розширення, і через те, що приймач і передавач використовують один і той же код, переходи між каналами виконуються синхронно.

Типова блок-схема передавальної частини зв'язку з FHSS має наступний вигляд:

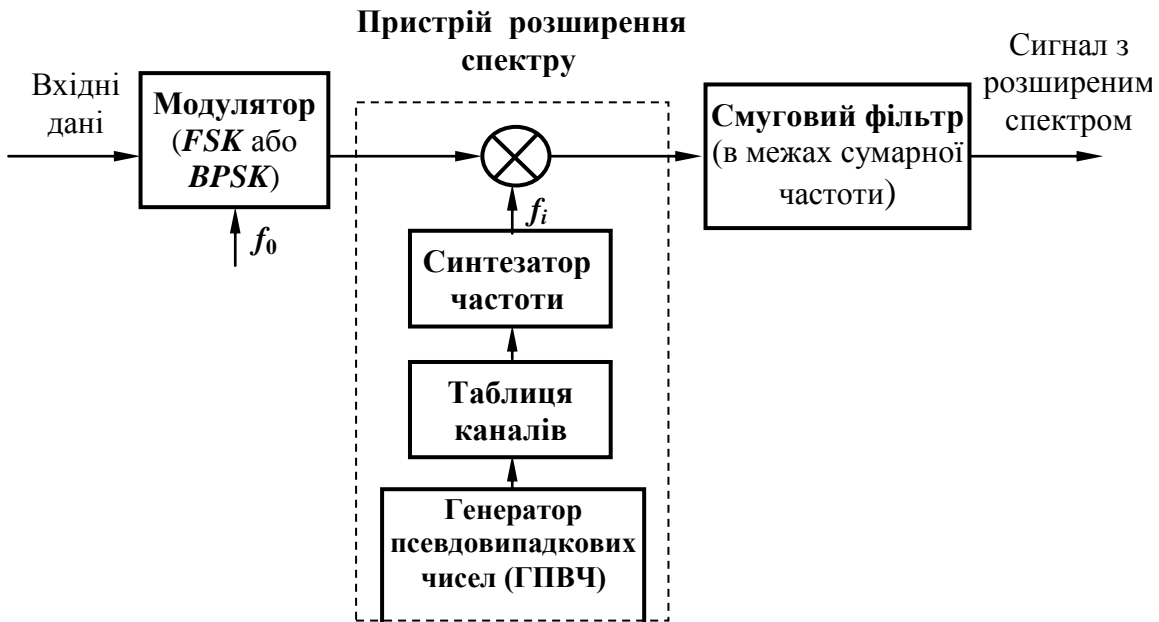


Рис. 5.2.

В передавачі двійкові дані подаються на модулятор, що працює з використанням, наприклад, частотної маніпуляції (*frequency-shift keying – FSK*) або ж бінарної фазової маніпуляції (*binary phase shift keying – BPSK*). Отриманий сигнал центрований на деякій базовій частоті f_0 .

Генератор псевдовипадкових чисел застосовується для отримання індексів таблиці частот. Кожні k біт на виході генератора визначають одну з 2^k несучих частот. Для кожного з наступних інтервалів часу (якому відповідає k біт псевдовипадкового коду) обирається нова несуча частота. Форма одержаного сигналу не зміниться, однак він буде центрований на вибраній частоті. Приймач демодулює отриманий сигнал розширеного спектру за допомогою тієї ж послідовності частот, що використовувалась на передачі. Для отримання вихідних даних отриманий сигнал ще раз демодулюється. В схемі на рис. 5.2 для спрощення показано перемноження двох сигналів.

З технологією *FHSS* часто використовується багаточастотна маніпуляція (*multiple frequency shift keying – MFSK*).

Підсумуємо:

- саме застосування швидкої перебудови частоти приводить до розширення спектру інформаційного сигналу.

5.3. Розширення спектру методом прямої послідовності (DSSS)

В даних сигналах при передачі кожному початковому біту ставиться у відповідність декілька бітів коду розширення. Ступінь розширення спектру прямо пропорційна кількості бітів коду розширення. Тобто 10-бітовий код розширює смугу частот сигналу в 10 разів більше, ніж 1-бітовий код. Інакше кажучи, спектр розширюється у стільки разів, у скільки тривалість елементарного символу коду розширення ГПВЧ T_c менша тривалості символу початкових даних T :

$$\text{Ступень розширення спектру} = \frac{T}{T_c}$$

Один із методів застосування *DSSS* – комбінування цифрового інформаційного потоку і бітової послідовності коду розширення з використанням суматора по модулю 2 – вузла нерівнозначності („виключаючого АБО”). Ця операція виконується відповідно до таких правил:

$$0 \oplus 0 = 0, \quad 0 \oplus 1 = 1, \quad 1 \oplus 0 = 1, \quad 1 \oplus 1 = 0$$

Варіант використання схеми розширення спектру 4-бітовою послідовністю зображено на рис. 5.4.

Спрощену блок-схему передавальної частини системи *DSSS* зображено на рис.5.3, а спектри інформаційного, псевдовипадкового та результуючого сигналів - на рис. 5.5.

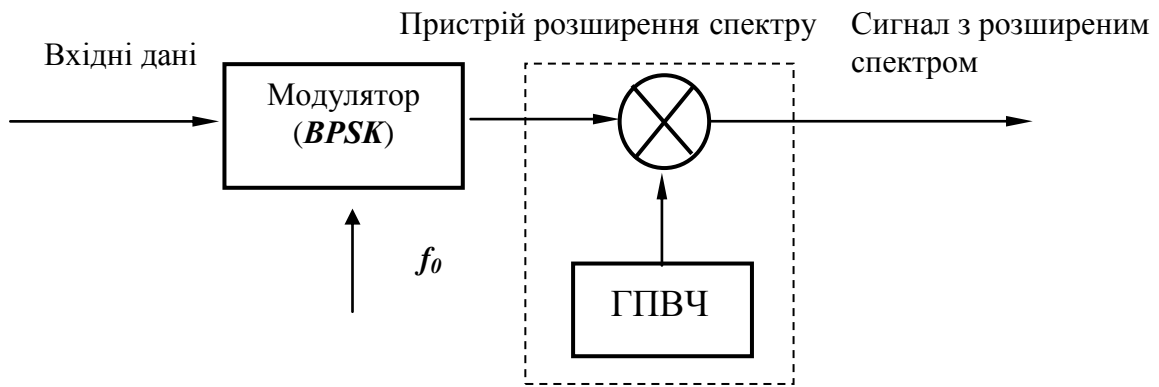


Рис. 5.3.

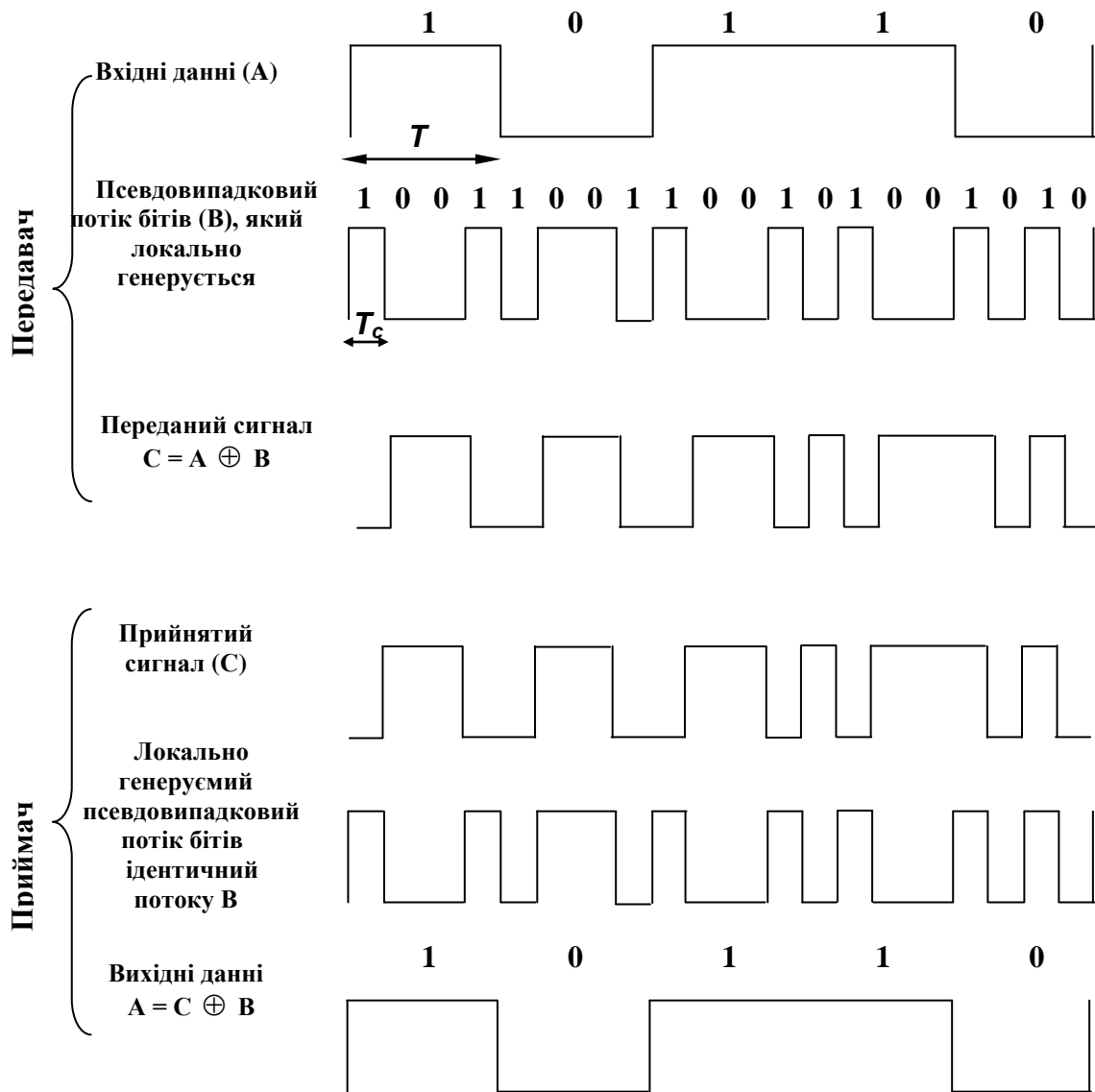
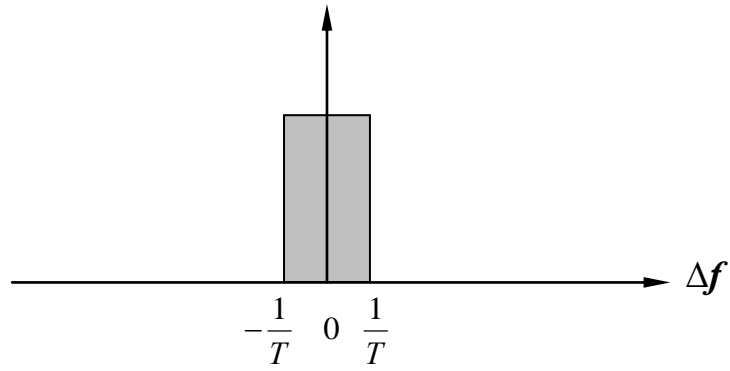
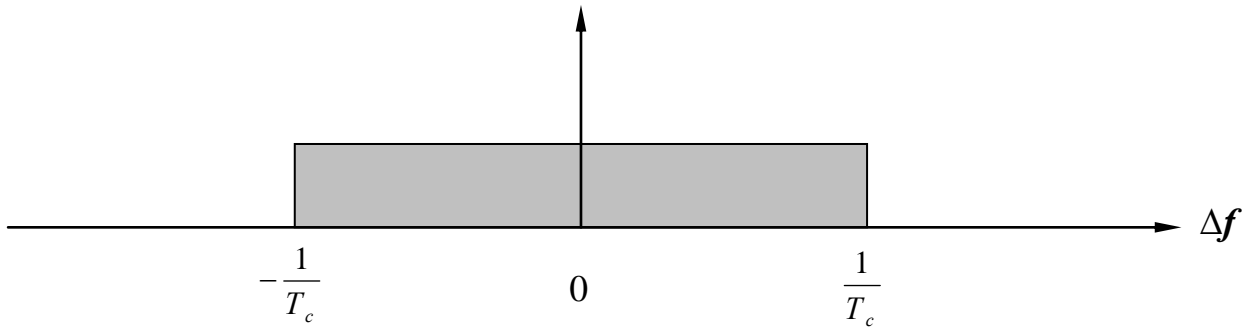


Рис. 5.4. Приклад використання розширення спектру методом прямої послідовності

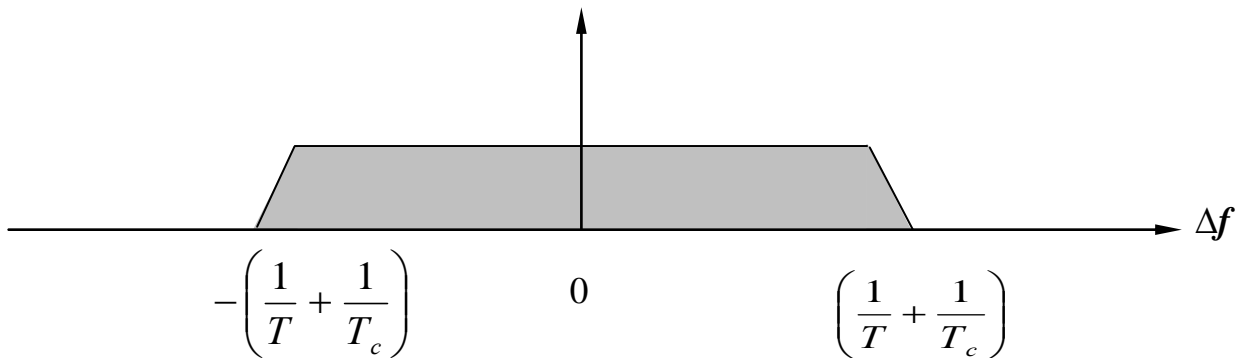
Енергія сигналу



а) Спектр інформаційного сигналу



б) Спектр псевдовипадкового сигналу



в) Спектр сумарного сигналу

Рис. 5.5. Приблизний спектр сигналу DSSS

$$(\Delta f = |f_0 - f|)$$

Питання самоконтролю до розділу

1. Поясніть класифікацію систем радіозв'язку з рухомими об'єктами.
2. В чому різниця систем з централізованим і незалежним методом формування групового каналу?
3. Коли системи радіозв'язку повинні бути контрольованими?
4. Які системи радіозв'язку називаються координованими?
5. Поясніть сутність методів *FDMA*, *TDMA*, *CDMA*.
6. В чому різниця технологій дуплексного рознесення *TDD* і *FDD*?
7. Який і чому діапазон радіозв'язку використовується в системах радіозв'язку з рухомими об'єктами?
8. Як доплерівський ефект впливає на радіозв'язок з рухомими об'єктами?
9. Як розрахувати доплерівський зсув та визначити його знак?
10. Поясніть принцип роботи модулятора $\pi/4$ *DQPSK*.
11. Що таке маніпуляція з мінімальним зсувом, як вибирається частота зсуву?
12. В чому суть та основні переваги модуляції *OFDM*?
13. Назвіть і поясніть переваги широкосмугових сигналів.
14. Поясніть принцип розширення спектру методами *FHSS* та *DSSS*.
15. Як визначити ступень розширення спектру в технології *DSSS*?

ЧАСТИНА II. Відомчі системи радіозв'язку.

6. Принципи організації пейджингового зв'язку

6.1. Призначення та класифікація систем

Персональний радіовиклик (з англ. paging - пейджинг) являє собою послугу, що забезпечує по радіоканалу односторонню передачу інформації в межах зони обслуговування.

Система персонального радіовиклику (СПРВ) дозволяє передати виклик і необхідний мінімум інформації людині чи групі людей, незалежно від місця їхнього перебування. При цьому в більшості випадків немає необхідності в двосторонньому зв'язку, а досить передати коротку інформацію. У порівнянні з двостороннім телефонним зв'язком СПРВ:

- вимагає менших витрат на її організацію;
- більш ефективно використовує радіочастотний спектр, тому що один радіоканал може обслуговувати велику кількість абонентів;
- екологічність (відсутність в абонентів передавачів);
- можливість охоплення досить великих територій.

Спочатку СПРВ функціонували з радіусом дії, обмеженим територією підприємства чи приміщеннями всередині будинку, охопленими багатопровідною провідною петлею. Одна із перших систем цього типу – „Multiton” була розроблена в 1956 році. Вона відноситься до систем з індуктивним зв'язком і використовувала магнітне поле з низькими частотами несучих коливань.

Для значних територій СПРВ використовують діапазони *метрових і дециметрових* хвиль. У різних системах звичайно використовуються смуги частот, прилягаючі до: **30, 80, 160, 300 і 450 МГц**. Конкретні частоти виділяються в залежності від національних умов використання СПРВ і виду повідомлень, що передаються.

Зона впевненого прийому сигналів в діапазоні 450 МГц менша, ніж у діапазоні 160 МГц, що обумовлено менш сприятливими умовами поширення радіохвиль цього діапазону. Діапазони 450 і 900 МГц кращі в містах із щільною забудовою з залізобетонних будинків, тому що радіохвилі цього діапазону володіють гарною проникаючою здатністю і порівняно слабо виявляється вплив атмосферних і промислових завад.

Абонент СПРВ використовує малогабаритний приймач (*пейджер*), що має індивідуальний номер (адресу). У найпростішому випадку виклик передається по телефонній мережі оператору на центральну станцію, перетворюється в кодований радіосигнал і передається на виділеній для СПРВ частоті абоненту.

Якщо радіус дії для одного передавача центральної станції не дозволяє обслужити всю необхідну територію, то вона розбивається на окремі зони, у кожній з яких є свій радіопередавач. Сигнал виклику тривалістю 1...2 с передається всім пейджером, однак спрацює тільки той із них, що підстроєний на визначену частоту і має відповідну адресу. При цьому даний пейджер приймає повідомлення і відображає його на дисплеї. Сигнал виклику і повідомлення може передаватися циркулярно декільком абонентам.

У перших СПРВ (кінець 50-років) використовувався метод багаточастотного кодування. У цій системі при прийомі кодової комбінації даного абонента дешифратор вмикає низькочастотну частину приймача і відповідний абонент прослуховує мовне повідомлення, яке передане йому диспетчером. При цьому використовувалася *частотна модуляція* несучого коливання.

В наступних СПРВ почав застосовуватися метод двійкового цифрового кодування виклику. Звичайно використовувалася *частотна маніпуляція* або *ВФМн* (при передачі сигналів по системі радіомовлення).

Для двійкової передачі адреси і додаткової інформації використовувалися різні методи кодування :

- коди БЧХ (Боуза-Чоудхури-Хогвінгема);
- коди Грея;
- двійково-десятковий безнадлишковий код з повторенням кодової комбінації (у мережах *Multiton*).

З 1994 року з'явилася можливість організувати зворотний зв'язок пейджера із СПРВ.

За способом передачі сигналів СПРВ можна поділити на системи:

- з одностороннім зв'язком (одержали найбільше поширення);
- з двостороннім зв'язком.

За формою передачі повідомлень:

- тональних;
- цифрових;
- буквено-цифрових.

СПРВ можуть приймати повідомлення для відправки:

- по телефонній мережі через оператора;
- з ПК по електронній пошті;
- з виділених терміналів та ін.

Крім того, СПРВ класифікуються за наявністю наданих послуг оператором, а саме: довідкової інформації, роумінгу, повідомлень від охоронної чи іншої сигналізації і т.і.

В залежності від складу устаткування і призначення СПРВ можна поділити на:

- локальні (всередині будинків і на прилягаючій території; $P_{\text{пер}}$ до 5 Вт) ;
- міські (радіус дії – десятки км; $P_{\text{пер}}$ до 150 ÷ 300 Вт);
- регіональні (як правило, багатозонові, можливе застосування ретрансляторів).

Можливою є також побудова регіональних СПРВ із застосуванням пейджерних ретрансляторів. При цьому варіанті побудови кожна базова станція СПРВ, крім передавача, має приймач, що приймає повідомлення, які передаються сусідніми станціями. Ці прийняті повідомлення накопичуються в спеціальному буфері і передаються даною базовою станцією у виділений для неї інтервалі часу.

За топологією можна виділити три варіанти організації СПРВ:

- радіальний,
- стільниковий
- гібридний.

При радіальній організації використовується один передавач, антена якого має максимальну висоту підвісу. При стільниковій організації СПРВ встановлюється кілька передавачів у різних місцях території, що обслуговується, причому практично виключаються «мертві зони», де прийом повідомлень неможливий. При гібридній структурі використовуються як один передавач з високо піднятою антеною для передачі повідомлень на велику територію, так і ряд передавачів - ретрансляторів з низькими антенами. Ці передавачі служать як для розширення зони обслуговування, так і для усунення «мертвих зон».

За технологією організації зв'язку СПРВ можна виділити:

- трансляцію з використанням ретрансляторів, що працюють в режимі репітера (повторювача);
- стільникову технологію і технологію «*simulcast*»;
- використання декількох базових станцій, що працюють у режимі «*simulcast*».

6.2. Структура систем персонального радіовиклику і принципи їх функціонування

На рис. 6.1 представлена узагальнена структурна схема СПРВ, що складається з п'яти основних блоків:

- системи збору інформації (СЗІ);
- пейджерного терміналу (ПТ);
- передавача;
- антени;
- пейджера.

У загальному випадку **СЗІ** може містити в собі різні служби підготовки повідомлень. Як правило, обов'язковою й основною є підготовка повідомлень *за допомогою операторів*.

Для відправлення повідомлення абонент дзвонить *оператору* пейджерної компанії, що приймає повідомлення і готує його до наступної передачі. У великих СПРВ використовується не один оператор, а створюється мережа робочих місць операторів, що забезпечує всім операторам можливість взаємно незалежної й одночасної передачі повідомлень. Є також *служба* віддаленого доступу, що містить у собі службу винесених робочих місць операторів і службу передачі повідомлень, що надходять по комп'ютерних мережах зв'язку. *Служба винесених робочих місць операторів* дозволяє надати вилучений доступ у СПРВ різним підприємствам. На них пейджерна компанія встановлює винесене робоче місце чи оператора мережі робочих місць з комп'ютерами; при цьому співробітники можуть передавати свої повідомлення операторам, що знаходяться безпосередньо на підприємстві. *Служба комп'ютерного розсилання повідомлень* забезпечує відправлення повідомлень по існуючим комп'ютерним мережам, а також дозволяє сполучити послуги електронної пошти з послугою передачі повідомлення про надходження листа.

Відправлення цифрового повідомлення абоненту самостійно без участі оператора здійснює *служба автоматичного відправлення*

цифрових повідомлень. При цьому особа, яка відправляє повідомлення, дзвонить до пейджерної компанії по телефону з набором *DTMF*. Розвитком цієї служби є служба, що дозволяє передавати без участі оператора стандартні текстові повідомлення, кожному з який привласнюється свій цифровий код. Для передачі звукових повідомлень існує служба голосової пошти: текст повідомлення вводиться в комп'ютер, що перетворює його в цифрову форму. Потім це повідомлення передається по комп'ютерних мережах, знову перетворюється в приймальному комп'ютері в звукове повідомлення, що і прослуховує абонент.

Основним блоком СПРВ є **пейджерний термінал (ПТ)**, який формує відповідно до протоколу, що використовується, низькочастотний модулюючий сигнал для передавача, а також керує передавачем і здійснює безпосереднє відправлення повідомлень абонентам. Від пейджерного терміналу залежать основні можливості СПРВ:

- кількість абонентів;
- протокол, що використовується;
- швидкість передачі тощо.

Пейджерний термінал являє собою спеціальну плату в комп'ютері. З боку комп'ютера – це звичайний послідовний порт. Термінал одержує повідомлення від програмного забезпечення пейджерного сервера і поділяє їхній потік на пакети для формування *сигналу* модулюючого передавача. До пейджерного сервера підключається *локальна мережа операторських місць*, і він з'єднується кабелем керування з передавачем.

Якщо є інші, додаткові сервери, вони також підключаються до цієї локальної мережі. *Пейджерний сервер* підтримує всю базу даних абонентів і операторів, тільки на сервері адміністратор СПРВ може створити нових абонентів і операторів чи відключити їх.

Пейджерний термінал може виконуватися в *автономному* і *неавтономному виконанні*. **Автономні ПТ** містять у собі базу даних про абонентів, що використовується при формуванні модульованого сигналу для передавача. Звичайний автономний ПТ виконується у виді спеціалізованої мікроЕОМ. Зі збільшенням числа абонентів базу даних економічно доцільно винести з ПТ і помістити в ПЭВМ, такі ПТ називають **неавтономними**. Персональний комп'ютер, що працює разом із неавтономним ПТ, називають **пейджерним сервером**.

У системі СПРВ передбачається служба **роумінгу** (розсилання повідомлень), що дозволяє передати повідомлення через інші СПРВ. Ця служба дає можливість передати повідомлення абоненту, що знаходиться в даний момент поза зоною дії даної СПРВ. Служба роумінгу дозволяє використовувати пейджер у всіх містах, пейджерні компанії яких працюють в одній і тій же смузі частот і зв'язані угодою про створення єдиної мережі.

Передавач призначений для формування радіочастотного сигналу, модульованого низькочастотним сигналом від ПТ. Керуються передавачі або *безпосередньо*, або *дистанційно* по лінії або радіоканалу. Застосування знаходять як цифрові, так і аналогові

передавальні пристрої. Ширина зони, що обслуговується передавачем, залежить від його потужності і висоти антен. Оскільки потоки інформації передаються в цифровій формі, **антени** повинні мати досить широкую смугу пропускання.

Сервер додаткового сервісу дозволяє забезпечити автоматичне відправлення цифрових і формалізованих повідомлень, а також можливість взаємодії із середовищем *INTERNET* чи іншою локальною мережею, до якої підключений відправник повідомлення й оператор, що надає послуги пейджерного зв'язку.

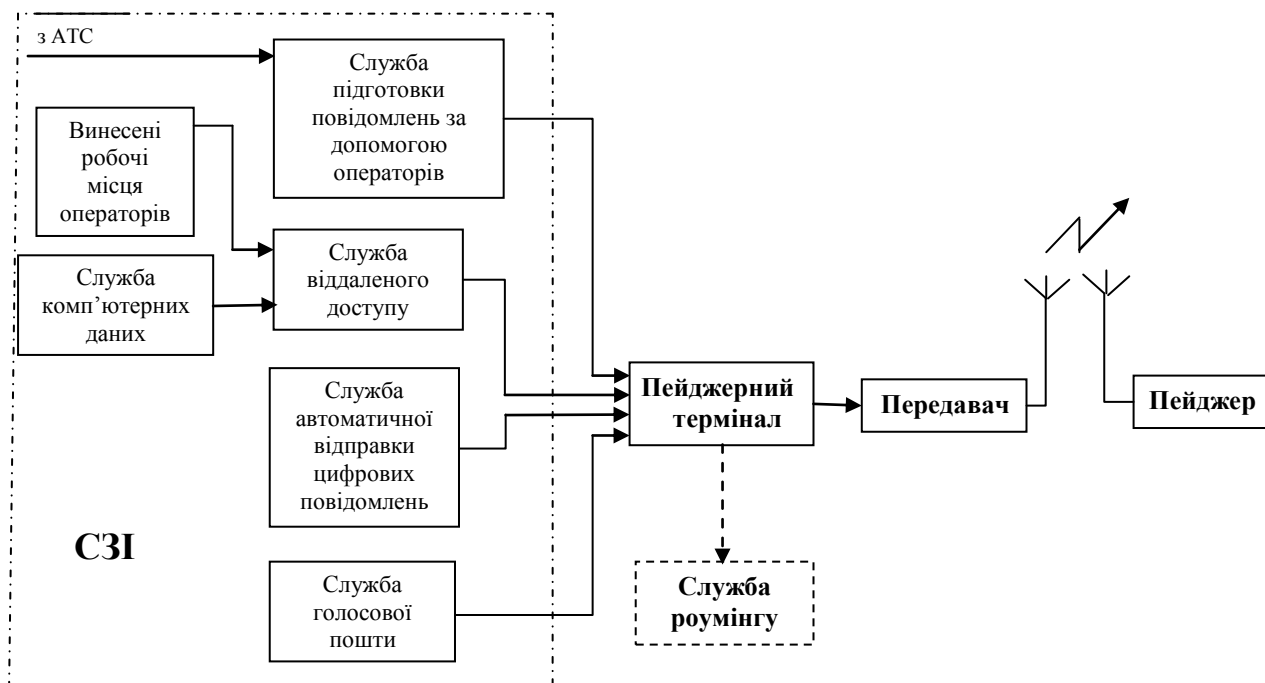


Рис. 6.1. Узагальнена структурна схема СПРВ

Винесені робочі місця для операторів дозволяють забезпечити доступ у СПРВ операторам, які розміщуються окремо від пейджерного терміналу. Винесений пульт оператора – це комп'ютер з модемом і програмним забезпеченням виділеного доступу, з'єднаний з пейджерним терміналом каналом зв'язку. В якості *каналу зв'язку* може використовуватися або звичайна телефонна мережа з відповідними модемами, або радіоканал з використанням радіомодема. На винесеному пульті оператор набирає номер абонента і передане повідомлення, що автоматично передається по лінії зв'язку на пейджерний термінал. Можлива організація локальної мережі з декількох винесених пультів операторів, що з'єднується з пейджерним терміналом каналам зв'язку з використанням високошвидкісних модемів.

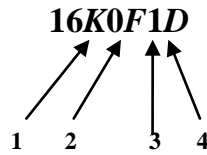
6.3. Характеристика радіосигналу СПРВ.

В СПРВ застосовують радіосигнали наступних видів випромінювань:
 - 16K0F1D, (канали передачі кодованої інформації);

- 16K0F3E (телефонія – для організації сервісних функцій у складі СПРВ).

В прийнятій системі повного позначення класу радіовипромінювання міститься інформація в кодованій формі про необхідну смугу частот B_n та інші характеристики радіосигналу.

Приклад:



Номер позиції:

Позиція №1 - необхідна ширина смуги частот (**16K0** - 16,0 кГц).

Позиція №2 - тип модуляції основної несучої (**F** - частотна).

Позиція №3 - характер сигналу, що модулює основну несучу (**1** - дискретний).

Позиція №4 - тип переданої інформації (**D** - передача даних).

При передачі POCSAG-повідомлень використовується частотна маніпуляцією (FSK) з девіацією (відхиленням) частоти від центральної $\Delta f = \pm 4,5$ кГц (для ряду моделей пейджерів $\pm 4,0$ кГц). При цьому в пакети збираються повідомлення з єдиною швидкістю передачі $B = 512; 1200$ або 2400 бод, тобто з єдиною частотою маніпуляції, що розраховується як $F_M = B/2$, Гц (256; 600 і 1200 Гц, відповідно швидкостям). У цьому випадку сигнал описується виразом $x = A_0 \sin(\omega_0 t + m \sin 2\pi F_M t)$, де m - індекс модуляції передавача, обумовлений як $m = \Delta f / F_M$, і, відповідно трьом швидкостям передачі повідомлень, рівний: 17,58; 7,5 і 3,75.

Для наближеної оцінки ширини практично займаної смуги частот, що враховує складові спектру сигналу не менше 1% амплітуди немодульованого сигналу, за рекомендацією МККР використовують співвідношення $B_3 = 2,6 \Delta f + 1,5B$.

Виходячи з цієї формули, розрахункові значення B_3 для швидкостей 512; 1200 і 2400 бод складуть 12,47; 13,5 і 15,3 кГц відповідно.

На рис. 6.2 представлений спрощений вигляд теоретично розрахованого спектру POCSAG-сигналу (на швидкості 1200 бод), а на рис. 6.3 – зображення реального спектру сигналу, прийнятого й відображеного на екрані спектр-аналізатора.

Тут слід зазначити, що при частотній модуляції при $m > 1$, основна частина потужності доводиться на частку бічних складових, а складова спектра із частотою f_0 може бути відсутня. Із цієї причини частоту f_0 називають не несучою, а середньою або центральною частотою ЧМ сигналу.

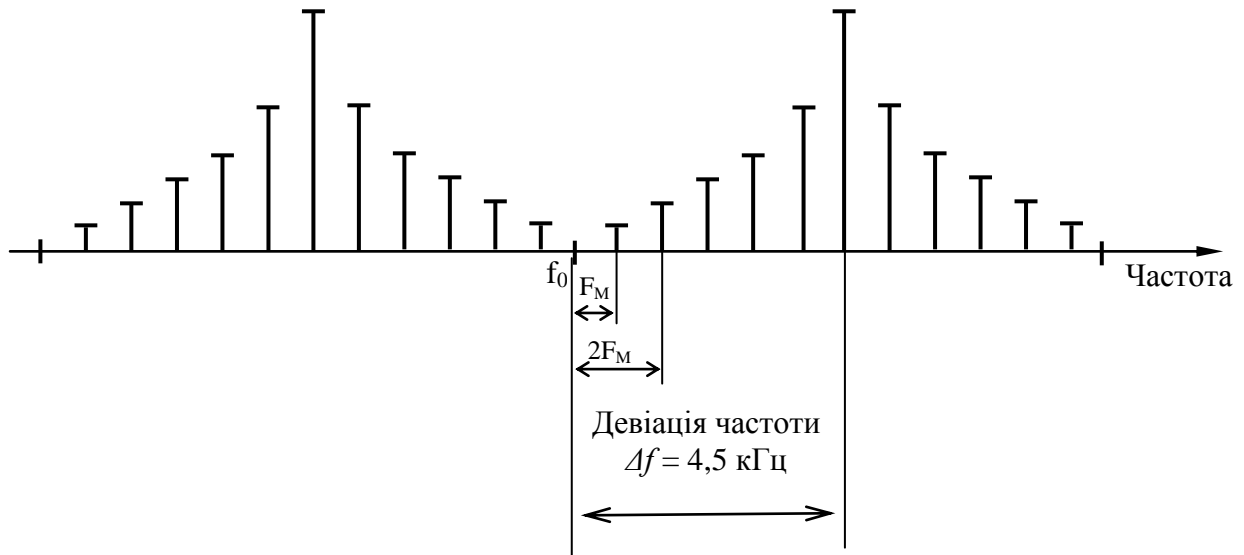


Рис. 6.2. Розрахунковий спектр POCSAG-сигналу (для швидкості 1200 бод)

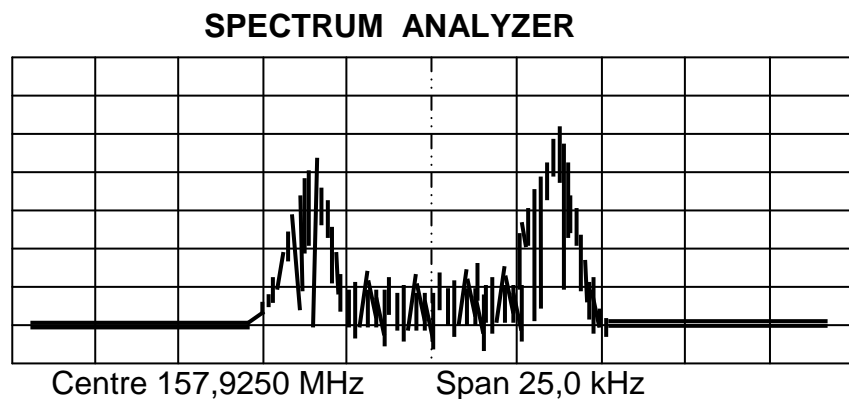


Рис. 6.3. Реальний спектр POCSAG - сигналу

Робоча частота СПРВ

При виборі робочої частоти враховують два аспекти:

- якість поширення сигналу;
- можливість роумінгу з іншими містами.

Оператори СПРВ в Україні працюють на частотах, які визначаються „Національною таблицею розподілу смуг радіочастот України”.

Для грубого розрахунку теоретичної зони покриття СПРВ використовують наступну формулу:

$$R(\text{км}) = 4,12 \sqrt{H},$$

де H – висота підвісу антени базової станції, м.

Додамо, що ця формула добре працює на рівнинній місцевості, коли H не менш чим в 4...8 разів перевищує середню висоту забудови в робочій зоні. Ідеальним місцем розміщення антени є міська телевішка.

Якщо місця для розміщення антени з необхідною висотою нема, то пейджингова система будується на основі використання декількох

передавачів (наприклад, базова станція й ретранслятори або група передавачів, що працюють у режимі “*simulcast*”).

На рис. 6.4 представлений графік ослаблення L сигналу залежно від відстані для частот 150 МГц і 450 МГц (у вільному просторі при ненаправлених приймальній та передавальній антенах).

Допустимо, що в СПРВ використовується антенно-фідерний тракт із втратами в кабелі -3 дБ і посилення антени +3 дБ, шуми на трасі та додаткові втрати сумарно -30 дБ, чутливість пейджера 5 мкВ і 10 мкВ. Для цих випадків у табл. 6.1 наведені результати розрахунку необхідної потужності передавача при взаємних відстанях між передавачем і пейджером 50, 100 і 150 км.

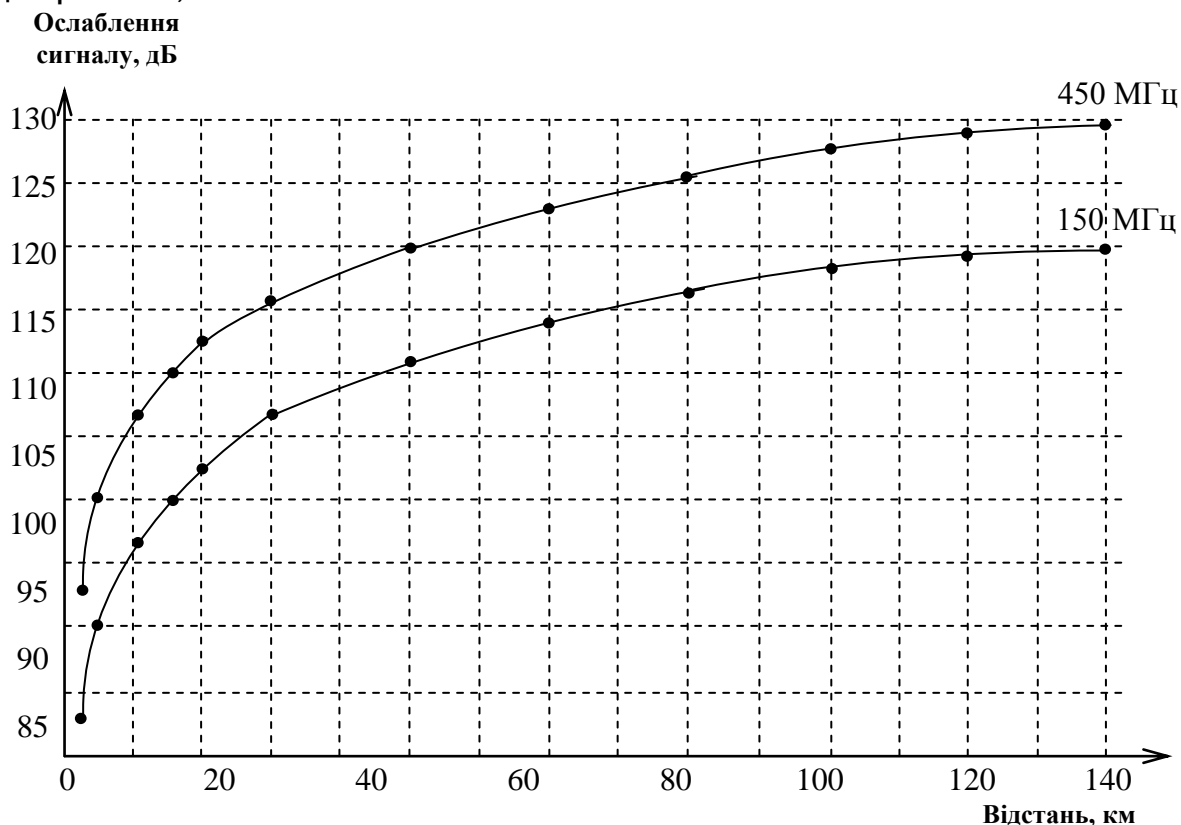


Рис. 6.4. Послаблення сигналу при розповсюдженні у вільному просторі в залежності від відстані та частоти

Таблиця 6.1

Необхідна потужність ПРД, Вт	Втрати у фідері, дБ	Посилення антени, дБ	Втрати на трасі на відстані, дБ	Шуми, дБ	Чутливість пейджера, мкВ
2,5 10	-3	+3	<u>50 км</u> -110	-30	5 10
15 46			<u>100 км</u> -116,6		5 10
25 79			<u>150 км</u> -120		5 10

6.4. Протоколи пейджингового зв'язку.

Перші системи персонального виклику (двотонного формату) були впроваджені в 50-х роках фірмою *MULTITONE* (Великобританія). Користувачами СПРВ були ділові люди, швидка медична допомога, поліція, пожежна охорона та ін. СПРВ розроблялись для послуг в діапазоні частот 80...931 МГц. Конкретні частоти виділялись в залежності від національних умов використання СПРВ і виду повідомлень, що передаються. Відповідно до Плану використання РЧР в Україні дозволено використання СПРВ лише за протоколами *POCSAG* і *Flex*, для яких виділена смуга частот від 160,975 до 161,25 МГц.

Основні протоколи пейджингового зв'язку

Таблиця 6.2

Протокол	Опис	Робочі частоти, МГц	Необхід на смуга частот каналу, кГц	Швидкість передачі даних у вихідному каналі, біт/с	Швидкість передачі даних у зворотному каналі, біт/с	Можливість роумінгу
POCSAG	Односторонній цифровий і буквено-цифровий пейджинг	Будь-які пейджингові частоти	25	512, 1200, 2400	Канал відсутній	-
ERMES	- // -	169,425 - 169,8	25	6250	Канал відсутній	Тільки в межах системи ERMES
RDS	В мережах УКХ радіомовлення	88 - 108	-	1200	Канал відсутній	-
FLEX	- // -	Будь-які пейджингові частоти	25	1600, 3200, 6400	Канал відсутній	Автоматичний
ReFLEX25	Двосторонній пейджинг, передача коротких повідомлень	929-931, 940-941 901-902	25 або 50	1600, 3200, 6400	800, 1600, 6400, 9600	Автоматичний
ReFLEX50	- // -	929-931, 940-941 901-902	50	До 25600	9600	Автоматичний
InFLEXion	Голосовий пейджинг з підтвердженням	929-931, 940-941 901-902	50	Цифрова компресія звуку	800, 1600, 6400, 9600	Автоматичний

POCSAG – Post Office Code Standardization Advisory Group

Стандарт *POCSAG* призначений для однієї передачі цифрових і буквено-цифрових повідомлень зі швидкостями 512, 1200 і 2400 біт/с. У стандарті *POCSAG* повідомлення передаються пакетами, для кодування яких застосовуються частотна маніпуляція (*FSK*) і метод прямого виправлення помилок на основі надмірності з використанням спеціального циклічного блокового коду.

ERMES – European Radio Message System

Стандарт призначений для однобічної передачі цифрових повідомлень (20...1600 знаків) і буквено-цифрових повідомлень (400...900 символів) з використанням символів кирилиці, а також підтримки режиму передачі даних обсягом до 64 кбайт. Під стандарт відведений частотний діапазон 169,4...169,8 МГц, що дозволяє організувати 16 радіоканалів з розносом несучих частот 25 кГц. Передача повідомлень здійснюється пакетами зі швидкістю 6,25 кбіт/с із застосуванням циклічного кодування і прямою корекцією помилок. Структура інформаційного пакета складається з чотирьох кадрів: синхронізації, службової інформації, заголовка (адреси) і безпосередньо інформаційного повідомлення. Для прийому повідомлень у стандарті *ERMES* застосовуються пейджері із приймачем, який сканує по частоті.

RDS – Radio Data System

Стандарт *RDS* призначений для передачі пейджингових повідомлень по каналах радіомовлення з ЧМ у діапазонах УКХ і FM (відповідно частоти 66...74 МГц і 87...108 МГц). Повідомлення передаються невеликими пакетами, що складаються з чотирьох груп. Кожна група містить у собі кодове слово і контрольну суму для виправлення помилок. Передача інформації здійснюється шляхом її доповнення до комплексного стереофонічного ЧМ сигналу на під несучій частоті 57 кГц із девіацією частоти ± 2 кГц. Повідомлення приймаються абонентськими радіомовними приймачами, які містять *RDS*-декодері, або спеціалізованими пейджеріми, які сканують радіомовний діапазон.

FLEX - Flexible Wide-area Protocol

Високошвидкісний пейджинговий стандарт *FLEX* був розроблений у 1993р. фахівцями компанії *Motorola* з метою підвищення пропускної спроможності радіоканалів. Завдяки раціональному розподілу інформаційних пакетів у часі передача повідомлень здійснюється на трьох швидкостях: 1600, 3200, 6400 біт/с, що дозволяє збільшити кількість абонентів в одній системі до 3,5 млрд. На основі стандарту *FLEX* було створено сімейство високошвидкісних протоколів - *ReFLEX* і *InFLEXion*, які розширюють можливості систем персонального радіовиклику.

6.5. Структура повідомлення протоколу *POCSAG*.

Найбільш відомим широко застосовуваним у світі є стандарт кодування сигналів для пейджерів *POCSAG*. Даний стандарт був розроблений Поштовим відомством Великобританії і відразу одержав велике визнання. У 1982 р. Він був затверджений Міжнародним консультативним комітетом з радіозв'язку (МККР) і Міжнародним союзом електрозв'язку як міжнародний стандарт, що одержав офіційну назву в документах МККР – протокол *RPC* №1 (*Radio Paging Code* № 1).

На початку свого створення (1978 р.) стандарт призначався для передачі тональних повідомлень зі швидкістю 512 біт/с, вже через рік він

був адаптований для передачі цифрових і буквено-цифрових повідомлень. Для кодування переданих повідомлень застосовується частотна маніпуляція.

Велика популярність стандарту *POCSAG* пояснюється перевагами розробленого протоколу, що має велику швидкість передачі інформації та ефективний алгоритм виправлення помилок. Згодом з метою збільшення кількості переданих повідомлень протокол був адаптований для швидкостей 1200 біт/с, а на початку 90-х років – для швидкостей 2400 біт/с.

В мережах *POCSAG* повідомлення передаються пакетами в асинхронному режимі, при формуванні яких використовується метод прямого виправлення помилок на основі надмірності за допомогою спеціального циклічного блокового коду.

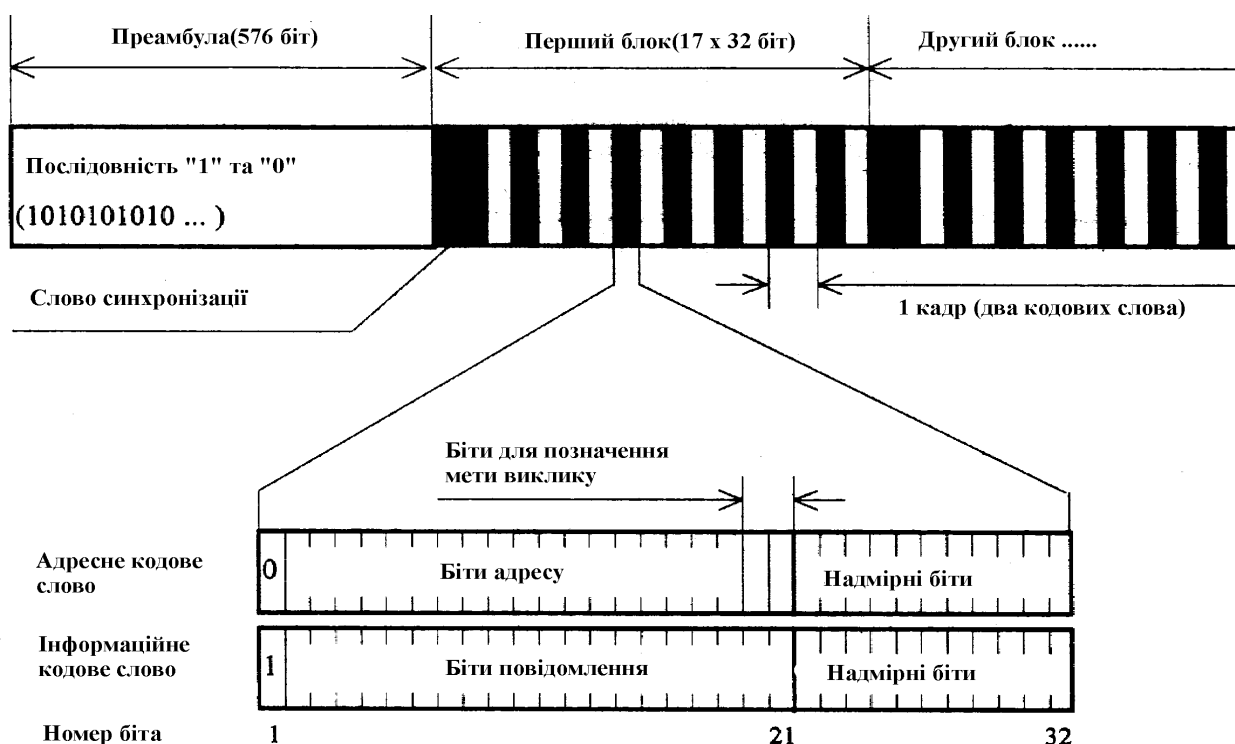


Рис. 6.5. Структура повідомлення в форматі *POCSAG*

На початку кожного пакету (див. рис. 6.5) є **преамбула** - кодове слово довжиною не менше 576 біт, що представляє собою послідовність одиниць і нулів: 101010... Під час передачі преамбули пейджер переводиться з режиму очікування в режим прийому повідомлень і здійснюється тактова синхронізація.

Після цього відбувається передача **блоків**, число яких у пакеті може бути довільним. Кожний блок складається з 17-ти 32-бітних слів. Перше з них – це **слово синхронізації** (фіксоване повідомлення довжиною 32 біта). А далі слідує послідовність з **восьми кадрів (фреймів)**. Кожний кадр містить **два кодових слова** (перше з них – адресне, а друге – інформаційне). Структура кадрів така, що кожному з них (пронумерованому від 0 до 7) відповідає визначена група пейджерів. Це означає, що кожний індивідуальний пейджер виявляється постійно закріпленим за конкретним кадром і буде приймати повідомлення, що

знаходиться тільки в цьому кадрі (це значно підвищує строк служби елементів живлення). Адресна ємність протоколу *POCSAG* дорівнює 2097152 адресам.

Кожне 32-розрядне слово містить 21 інформаційний біт та 11 надмірних (контрольних) бітів, призначених для виявлення та коригування помилок. Протокол передбачає виправлення помилок по алгоритму Блокгауза-Чоудхурі-Хоквінгема, скорочено БЧХ (32,21). На початку кодових слів є *прапор* для визначення типу прийнятого слова («0»- адресне, «1»- інформаційне слово). *Адресне поле*, яке дорівнює 18 бітам, призначене для відображення адреси пейджера. Інформація, яка закодована *функціональними бітами* (2 біти, які слідують за адресним полем в адресному слові), використовується для дозволу передачі на один пейджер багатократних повідомлень, таких як різні коди тональних посилок.

Інформаційне поле складається з 20 біт, але це не обмежує розмір переданого повідомлення, оскільки наступна частина повідомлення може бути передана в наступному блоці. Коли повідомлення закінчилося – передаються „пусті” слова до кінця блоку. Такий варіант передачі довгих повідомлень застосовується для зберігання структури протоколу.

Відповідно до алгоритму передачі інформації пейджери не аналізують усі передані повідомлення, а лише читають заголовки та оброблюють повідомлення, які адресовані їм. Це значно знижує енергоспоживання пейджерів, що працюють у стандарті *POCSAG*.

Збільшення швидкості передачі повідомлень веде до збільшення пропускної спроможності системи, але при цьому знижується чутливість радіоприйому, а фактично - зменшується радіус робочої зони прийому повідомлень. Для більшості пейджерів в залежності від швидкості передачі сигнал в точці прийому повинен бути не меншим за наступне значення:

- 512 біт/с - 5 мкВ/м;
- 1 200 біт/с - 7 мкВ/м;
- 2 400 біт/с - 9 мкВ/м.

6.6. Характеристика основних елементів СПРВ

Пейджинг-термінали

Пейджинг-терміналами називаються пристрої, які кодують призначені для відправлення на пейджери повідомлення у формат протоколу передачі даних (наприклад, *POCSAG*) і передають сформовані дані на передавач.

За набором виконуваних функцій пейджинг-термінали можуть значно відрізнятися один від одного. Єдиною обов'язковою функцією кожного з них є кодування повідомлень у формат протоколу передачі даних. Додатково пейджингові термінали можуть реалізувати такі функції:

- ведення бази даних абонентів (пейджерів);
- безпосереднє введення повідомлень і номерів абонентів із клавіатури;

- заміна номера абонента на адресу пейджера;
- переклад тексту повідомлення в кодування конкретного пейджера, якому воно призначено;
- передача даних, сформованих відповідно до використовуваного протоколу, в ефір і ряд інших.

Відповідно до набору виконуваних функцій пейджинг-термінал може мати *клавіатуру для введення повідомлень, вбудований передавач і передавальну антену.*

Пейджинг-термінал може мати різний набір вхідних інтерфейсів для введення адрес абонентів і повідомлень. Це може бути телефонний вхід (входи) для введення голосових, тонових і цифрових повідомлень, алфавітний вхід (входи) для підключення пристроїв введення текстової інформації, модемний вхід (входи) для підключення вилучених пристроїв і т.д.

У пейджинг-терміналі можуть бути застосовані різні інтерфейси для керування зовнішнім передавачем (передавачами) і трансляції на нього сформованих даних.

Пейджинг-термінал може бути виконаний:

- у вигляді спеціалізованого процесора (окремого автономного пристрою);
- спеціалізованої плати, що вставляється в персональний комп'ютер;
- у вигляді спеціального програмного забезпечення, що функціонує на стандартному персональному комп'ютері.

Базові станції

Базовою станцією (БС) у пейджингу звичайно *називають стаціонарний передавач, призначений для перетворення кодованих (наприклад, у форматі POCSAG) повідомлень у високочастотний сигнал, його посилення і передачі на АФП для випромінювання в ефір на пейджери або ретранслятори.*

До складу БС, крім передавача, можуть входити інші елементи (*приймач зв'язку, інтерфейси для зв'язку з пейджинговим терміналом по виділеній лінії й ін.*).

Основні вимоги до використовуваного в СПРВ передавача визначені діючими стандартами і технічними вимогами на устаткування систем персонального радіовиклику.

Конструктивно базові станції (БС) з підсилювачем виконуються в єдиних захищених металевих корпусах. Приклади передавачів СПРВ: *PURC-5000 (Motorola); GL-T8311 (Glenayre); Nucleus (Motorola); BS (Пейдж-Лінк Технологія); SRPT-3000 (Samsung).*

Анени

У СПРВ, як правило, використовуються (і далі розглядаються) *анени з вертикальною поляризацією* електромагнітного випромінювання, вектор напруженості електричного поля (E) їхнього випромінювання вертикальний до земної поверхні.

Основними типами антен є:

- для метрового діапазону радіохвиль - *симетричний вібратор* (випромінювач) і його різні комбінації;
- для дециметрового діапазону радіохвиль - крім *симетричних вібраторів*, використовуються також і *щільові, дзеркальні, рупорні* і ряд інших типів антен.

Основними параметрами антен є:

- *характеристика спрямованості* (діаграма спрямованості в горизонтальній і вертикальній площині, кут вертикального піднесення);
- *коефіцієнт підсилення*;
- *робочий діапазон (смуга пропускання)*;
- *вид поляризації*.

Прикладом антен для роботи в СПРВ є *двовібраторна штирвова антена Cuchcraft CRX-150B* і антена на основі петльових вібраторів *TELEWAVE 150D6-9* (її російський аналог – антена система серії *D* фірми “Радіал”),

Анени СПРВ встановлюються на дахах будинків, вершинах щогл чи середніх поверхах щогл за умови їх радіопрозорості. Загальним недоліком цих антен є неможливість одержання кругової діаграми спрямованості при установці на середніх поверхах радіонепрозорих щогл, неможливість установки на вишках, що обслуговуються, на одній висоті з персоналом і на стінах будинків через сильне випромінювання “назад”, неможливість коригувати діаграму спрямованості у вертикальній площині.

Останнє зауваження особливо важливе, тому що в антен із круговою діаграмою спрямованості, але з високим коефіцієнтом підсилення, ширина діаграми спрямованості у вертикальній площині досить мала (6...18°) і навіть незначне збільшення кута вертикального піднесення, наприклад, через вплив навколишніх предметів чи неточної її установки, може привести до того, що основне випромінювання антени взагалі не досягне землі (особливо це стосується антен з висотою підвісу більше 100 м).

Зазначених недоліків позбавлені антенні системи, складені за допомогою роздільників потужності – *спліторів* і спрямованих антен. Кількість спрямованих антен у системі, як правило, 2...8. Спрямовані антени використовуються також для роботи з пріоритетним напрямком чи для організації зв'язку з ретрансляторами.

Основними видами спрямованих антен є антени типу “хвильовий канал”, одно - і багатовібраторні антени з рефлектором, логіперіодичні антени, панельні антени на основі фазованих решіток.

Приймачі СПРВ

Приймач персонального радіовиклику (пейджер) являє собою малогабаритний вузькосмуговий високочутливий (5..10 мкВ/м) приймач, як правило, побудований за схемою з подвійним перетворенням частоти.

Вбудована в пейджер антена має близьку до сферичної діаграму спрямованості, що забезпечує прийом сигналу з будь-яких напрямків.

За способом прийому і відображення інформації пейджери поділяються на *тонові, голосові, цифрові і літеро – цифрові, графічні тощо*.

Пейджер реалізується у вигляді мініатюрного приймача, що носить на грудях, у кишені, на поясі, або у вигляді браслета на руці. Узагальнена схема пейджера показана на рис. 6.6. У загальному тракті прийому (ЗТП) здійснюється підсилення, селекція і перетворення сигналу. У блоці обробки сигналу (БОС) він декодується для визначення відповідності чи невідповідності прийнятої адреси власній адресі абонента і, якщо крім виклику передається додаткова інформація, то вона обробляється, при необхідності записується в пам'ять і відображається на дисплеї (ДС). Пристрій сигналізації (ПС) сигналізує в тій чи іншій формі про наявність виклику. Блок управління (БУ), керуючи роботою усього пейджера, містить у собі таймер, перемикач виду сигналізації, перемикач режиму очікування і джерело живлення.

Антенами приймальних пристроїв персонального виклику, як правило, є або паралельні пластини, що одночасно є корпусом пейджера, або рамка, розташована по периметру корпусу.

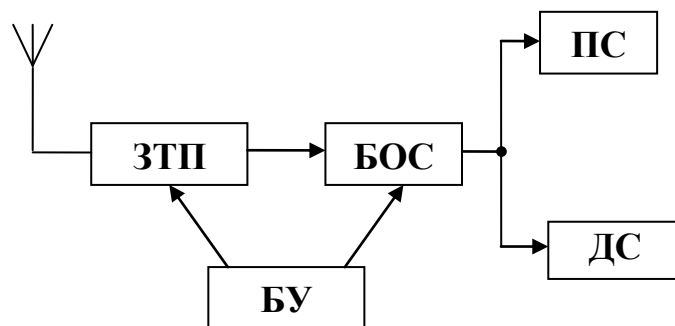


Рис. 6.6. Узагальнена схема пейджера

У пейджерах більш ранніх розробок ЗТП виконувався за схемою з подвійним перетворенням частоти, потім з'явилися з однократним перетворенням частоти. В останніх розробках мініатюрних пейджерів ЗТП часто реалізується за схемою з прямим перетворенням (гомодинні приймачі, приймачі із синхронним детектування, синхродини). У подібних приймачах, як відомо, немає дзеркального каналу, що дозволяє істотно спростити преселектор приймача. Застосування гіраторів або цифрових фільтрів також дозволяє зробити тракт підсилення менш складним. У пейджерах з більш широкими можливостями, призначеними для роботи в глобальних системах персонального виклику, ЗТП виконується за схемою з подвійним перетворенням частоти.

Пристрій ПС може містити в собі акустичну, світлову і тактильну сигналізацію. Тактильна сигналізація здійснює вплив на шкіру людини за допомогою мініатюрного вібратора. Споживач вибирає вид сигналізації на свій розсуд. Якщо пейджер розташований не безпосередньо на тілі споживача, то доцільнішим є використання звукової сигналізації, що, однак, може бути непомітною в гучному приміщенні. Тоді про виклик може сповістити світлова сигналізація.

Програмування і порядок активізації пейджерів

Кожен пейджер, як приймач персонального радіовиклику, має індивідуальні і групові адреси, названі *кеп-кодами* (для стандарту *POCSAG* – числа в діапазоні від 8 до 2097151), необхідні для прийому адресованих йому повідомлень. Ця інформація заноситься в пейджер при програмуванні перед його видачею абоненту.

Технологія програмування залежить від моделей пейджера. Одні моделі дозволяють вносити всю інформацію за допомогою кнопок на пейджері (дуже трудомістке заняття), інші – за допомогою спеціального пристрою – програматора.

Для програмування групових каналів у деяких пейджерах (наприклад, фірми *PHILIPS*) передбачене програмування по радіоканалу: на спеціально запрограмований майстер кеп-код посилається повідомлення, яке відкриває новий кеп-код у пейджері з іконкою групового каналу чи закриває існуючий кеп-код, тобто дозволяє чи забороняє пейджеру приймати інформацію, що відправляється по груповому каналі на цей кеп-код.

Програматори можуть мати два типи конструктивного виконання:

- *автономний* – невелика коробочка з клавіатурою і дисплеєм, до якої підключається пейджер;
- *комп'ютерний* – являє собою настільний прилад (розмірами приблизно 20x20x5 см), що інформаційним входом підключається до ПК.

Для програмування пейджер встановлюється на спеціальне місце (“стакан”), що є на програматорі. Комп'ютер використовує спеціалізовану програму для програмування пейджера необхідної моделі.

Для різних моделей пейджерів набір параметрів трохи відрізняється, але ряд параметрів є загальним.

До загальних параметрів пейджерів, зокрема, відносяться:

- індивідуальний кеп-код, на який посилаються особисті повідомлення;
- групові кеп-коди, по яких посилаються групові повідомлення, наприклад, курс валюти, прогноз погоди, затори на дорогах і т.д.;
- тип повідомлень (тональний, цифровий, літеро-цифрові);
- функція (частина адреси, що визначає спосіб прийому і реакцію пейджера на прийняте повідомлення);
- швидкість прийому даних і стандарт сигналу;
- інверсія даних (прийом даних у прямому чи інверсному кодуванні).

Деякі пейджери приймають як пряме, так і інверсне кодування.

Крім загальних, деякі моделі пейджерів мають індивідуальні параметри, що встановлюють, наприклад, порядок показу службових повідомлень (про розрядку батарей електроживлення й ін.), формат висновку повідомлень, порядок прийому й індикації дубльованих повідомлень. Останній параметр особливо важливий при експлуатації пейджера в СПРВ, що мають ехо-репітори і зони подвійного прийому повідомлень. При програмуванні в пейджері цього параметра, як правило, забороняється показ пейджером у вигляді окремого повідомлення (протягом 5-10 сек.) повідомлень, які прийняті повторно.

Важливим завданням при програмуванні пейджерів є вибір стратегії розподілу індивідуальних і групових кеп-кодів. У більшості компаній-операторів перші три цифри кеп-коду резервують для утворення групи (по містах, моделях пейджерів і ін.). Інші цифри кеп-коду використовують для призначення індивідуальних номерів пейджерів довільним чином. Ці цифри задають у стандарті *POGSAG* номер фрейму (залишок від поділу на 8).

7. Мережі транкінгового зв'язку.

7.1. Загальні відомості та класифікація систем.

Загальні відомості

Системи професійного радіозв'язку можна умовно поділити на:

- **конвенційні** системи (англ. *conventional* - звичайний, традиційний) – радіосистеми, які не потребують управління ресурсами, сигналізацію та координацію, а абоненти/групи закріплюються за тим або іншим радіоканалом системи;
- **транкінгові** системи.

В першому випадку базова станція (якщо вона застосовується) виконує функцію ретранслятора (репітера) для збільшення зони покриття системи, а в другому випадку базова станція є обов'язковим елементом, що координує роботу всієї системи. Конвенціональні системи ефективні при малій кількості абонентів або малому навантаженні в мережі.

Транкінговими системами називаються радіально-зонові системи рухомого УКХ - радіозв'язку, що здійснюють автоматичний динамічний розподіл каналів базових станцій (ретрансляторів) між абонентами.

Термін "*транкінг*" походить від англійського *trunking*. Можливий переклад цього слова – групо утворення, "об'єднання в пучок". Ця концепція передбачає надання доступу в мережі багатьом абонентам за допомогою виділення на сеанс зв'язку вільних ліній (каналів) із наявного набору замість закріплення їх індивідуально.

Транкінгові системи (*TRS - trunked radio systems*) відносяться до професійних систем мобільного радіозв'язку (*PAMR*). Вони є класом систем рухомого зв'язку, орієнтованим, насамперед, на створення різних відомчих і корпоративних мереж зв'язку, в яких передбачається активне застосування режиму зв'язку абонентів у групі. Транкінгові системи широко використовуються силовими і правоохоронними структурами, службами безпеки, транспортними й енергетичними компаніями різних країн для забезпечення зв'язку рухомих абонентів між собою, зі стаціонарними абонентами й абонентами телефонної мережі загального користування.

Класифікація транкінгових систем

Існує велика кількість різних стандартів транкінгових систем рухомого радіозв'язку загального користування (*СРР-ЗК*), що відрізняються один від одного методом передачі мовної інформації, типом багатостанційного доступу, способом пошуку і призначенням каналу, типом каналу керування та іншими характеристиками.

Для класифікації транкінгових систем зв'язку використовують такі ознаки:

Метод передачі мовної інформації

За методом передачі мовної інформації транкінгові системи підрозділяються на *аналогові* і *цифрові*. Передача мови в радіоканалі аналогових систем здійснюється з використанням частотної модуляції, а крок сітки частот звичайно складає 12,5 кГц або 25 кГц.

Для передачі мови в цифрових системах використовуються різні типи вокодерів, що перетворюють аналоговий мовний сигнал у цифровий потік зі швидкістю не більше 4,8 Кбіт/с.

Тип багатостанційного доступу

У переважній більшості транкінгових систем, включаючи і цифрові системи, використовується багатостанційний доступ з *частотним розподілом (FDMA)*. Для цих систем справедливе співвідношення "одна несуча - один канал". В системах стандарту *TETRA* використовується багатостанційний доступ з *часовим розподілом (TDMA)*.

Спосіб пошуку і призначення каналу

За способом пошуку і призначенням каналу розрізняють *системи з децентралізованим і централізованим керуванням*.

У системах з *децентралізованим керуванням* процедуру пошуку вільного каналу виконують абонентські радіостанції. У цих системах ретранслятори базової станції звичайно не зв'язані один з одним і працюють незалежно. Особливістю систем з децентралізованим керуванням є відносно великий час встановлення з'єднання між абонентами, що зростає зі збільшенням числа ретрансляторів. Така залежність викликана тим, що абонентські радіостанції змушені безупинно послідовно сканувати канали в пошуках сигналу виклику (останній може надійти від будь-якого ретранслятора) чи вільного каналу (якщо абонент сам посилає виклик). Найбільш характерними представниками даного класу є системи протоколу *SmartTrunk*.

У системах з *централізованим керуванням* пошук і призначення вільного каналу реалізується на базовій станції. Для забезпечення нормального функціонування таких систем організуються канали двох типів: *робочі (Traffic Channels)* і *канал керування (Control Channel)*. Усі запити на надання зв'язку направляються по каналу керування. По цьому ж каналу базова станція сповіщає абонентські пристрої про призначення робочого каналу, відхилення запиту, або про постановку запиту в чергу.

Тип каналу керування

В усіх транкінгових системах *канали керування є цифровими*. Розрізняють системи з *виділеним частотним каналом керування* і *системи з розподіленим каналом керування*. У системах першого типу передача даних у каналі керування здійснюється зі швидкістю до 9,6 кбіт/с, а для вирішення конфліктів використовуються протоколи типу *ALOHA*. Виділений канал керування мають усі транкінгові системи протоколу *MPT1327*, системи фірми *Motorola (Startsite, Smartnet, Smartzone)*, система *EDACS* фірми *Ericsson* та деякі інші.

У *системах з розподіленим каналом керування* інформація про стан системи і викликів, що поступають, розподілена між низькошвидкісними субканалами передачі даних, сумісними з усіма робочими каналами. Таким чином, у кожному частотному каналі системи передається не тільки мова, але і дані каналу керування. Для організації такого парціального каналу в аналогових системах звичайно використовується субтональний діапазон частот 0...300 Гц. Найбільш характерними представниками даного класу є системи протоколу *LTR*.

Спосіб утримання каналу

Транкінгові системи дозволяють абонентам *утримувати канал зв'язку протягом усієї розмови чи тільки на час передачі*. Перший спосіб, називають також *транкінгом повідомлень (Message Trunking)*, найбільш традиційний для систем зв'язку і обов'язково використовується у всіх випадках застосування дуплексного зв'язку чи з'єднання з ТфЗК.

Другий спосіб, що передбачає утримання каналу тільки на час передачі, називається *транкінгом передач (Transmission Trunking)*. Він може бути реалізований тільки при використанні напівдуплексних радіостанцій. В останніх передавач включається тільки на час проголошення абонентом фраз розмови. У паузах між закінченням фраз одного абонента і початком відповідних фраз другого абонента передавачі обох радіостанцій виключені. Деякі транкінгові системи ефективно використовують такі паузи, звільняючи робочий канал негайно після закінчення роботи передавача абонентської радіостанції. Для відповідної репліки призначення робочого каналу буде зроблено заново, при цьому репліки тієї самої розмови будуть, швидше за все, передаватися по різних каналах. Платою за деяке підвищення ефективності використання системи в цілому при застосуванні транкінга передач служить зниження комфортності переговорів, особливо в години високого навантаження. Робочі канали для продовження початої розмови в такі періоди будуть надаватися з затримкою, що досягає декількох секунд, що приведе до фрагментарності і роздробленості розмови.

Кількість зон

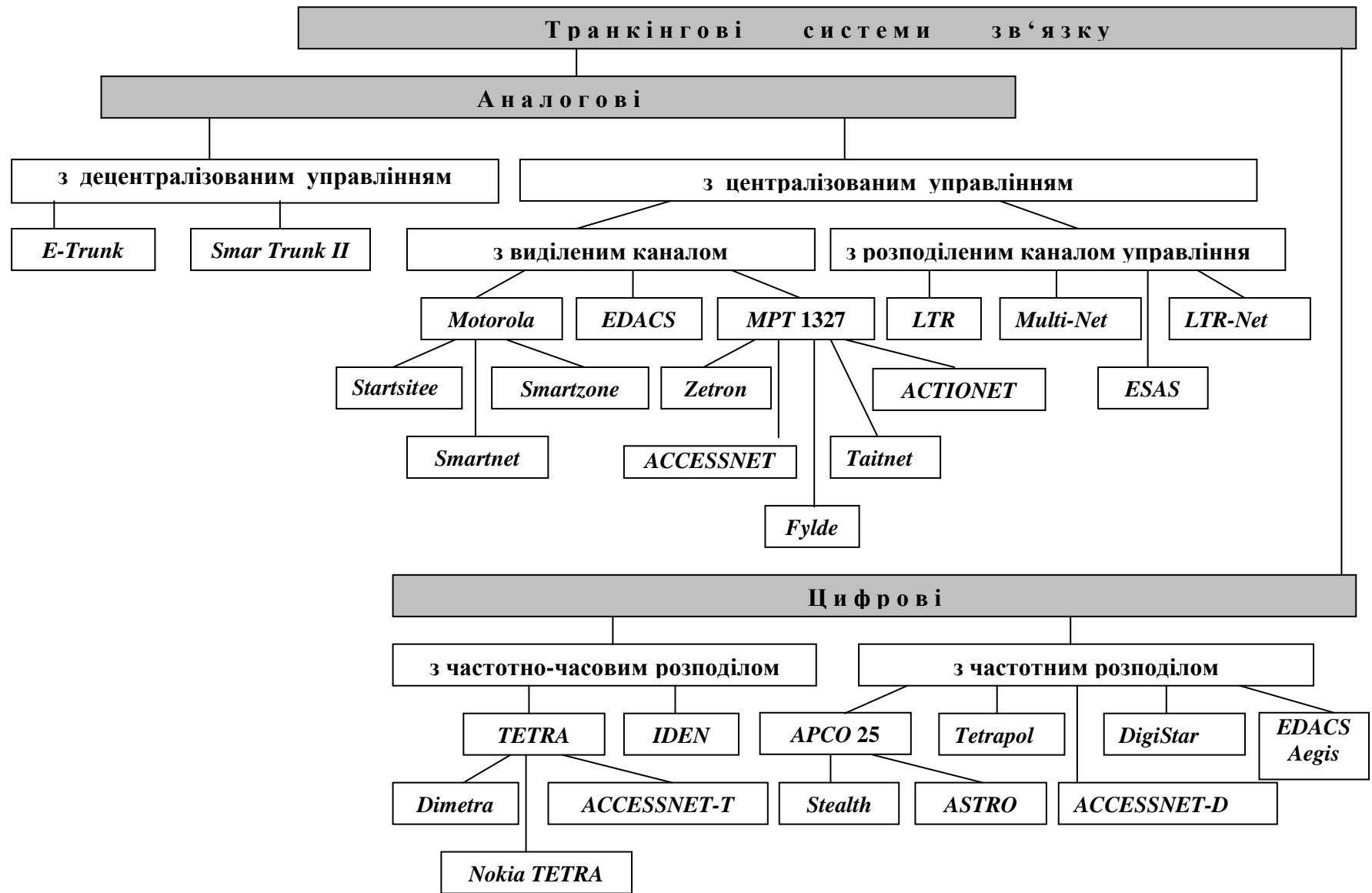
У залежності від кількості базових станцій і загальної архітектури розрізняють *однозонові і багатозонові системи*. Перші обладнуються лише однією базовою станцією, другі - декількома БС із можливістю роумінгу.

Метод об'єднання базових станцій у багатозонових системах

Базові станції в транкінгових системах можуть поєднуватися за допомогою єдиного комутатора (*системи з централізованою комутацією*), а також з'єднуватися один з одним безпосередньо чи через мережі загального користування (*системи з розподіленою комутацією*).

Кількість фізичних каналів для з'єднання

Абонентські станції можуть працювати у дуплексі (одночасний прийом та передача), або у напівдуплексі (для передачі та прийому використовують різні канали, але одночасний прийом та передача не можливі) (див. рис. 7.2).



7.2. Архітектура транкінгових систем

Узагальнена структурна схема однозонової транкінгової системи зображена на рис.7.1. Інфраструктура транкінгової системи представлена **базовою станцією** (БС), до складу якої, крім радіочастотного обладнання (ретрансляторів, пристроїв об'єднання радіосигналів, антен), входять також комутатор, пристрій керування (контролер) та інтерфейси різних зовнішніх мереж.

Ретранслятор - набір прийомопередавального обладнання, яке обслуговує одну пару несучих частот.

Антену. Найважливіший принцип побудови транкінгових систем полягає в тому, щоб створювати зони радіопокриття настільки великими, наскільки це можливо. Тому антени базової станції, як правило, розміщуються на високих спорудах чи щоглах, мають кругову діаграму спрямованості. Зрозуміло, що при розташуванні базової станції на краю зони, застосовуються спрямовані антени. Базова станція може бути обладнана як єдиною прийомопередавальною антеною, так і роздільними антенами для прийому і передачі. У деяких випадках на одній щоглі можуть розміщуватися кілька прийомних антен для боротьби із завмираннями, які викликані багатопроменевим розповсюдженням радіохвиль.

Пристрій об'єднання радіосигналів дозволяє використовувати одне й те саме антенне устаткування для одночасної роботи приймачів і передавачів на декількох частотних каналах. Ретранслятори транкінгових систем працюють тільки в дуплексному режимі, причому рознесення частот прийому і передачі (дуплексне рознесення) в залежності від робочого діапазону складає від 3 МГц до 45 МГц.

Комутатор в однозоновій транкінговій системі обслуговує весь її трафік, включаючи з'єднання рухомих абонентів з телефонною мережею загального користування (ТфЗК) і усі виклики, пов'язані з передачею даних.

Пристрій управління забезпечує взаємодію всіх вузлів базової станції. Він також обробляє виклики, здійснює автентифікацію абонентів, які викликають (перевірку "свій-чужий"), ведення черг викликів і внесення записів у бази даних погодинної оплати. У деяких системах цей пристрій регулює максимально припустиму тривалість з'єднання з телефонною мережею. Як правило, використовуються два варіанти регулювання: зменшення тривалості з'єднань у заздалегідь задані години найбільшого навантаження чи адаптивна зміна тривалості з'єднання в залежності від поточного навантаження.

Інтерфейс ТфЗК реалізується в транкінгових системах різними способами. У недорогих системах (наприклад, *SmarTrunk*) підключення може реалізовуватись по *двопровідних лініях*, що комутуються. Більш сучасні ТСЗ мають у складі інтерфейсу до ТфЗК *апаратуру прямого набору номера DID (Direct Inward Dialing)*, що забезпечує доступ до

абонентів трекінгової мережі з використанням стандартної нумерації АТС.

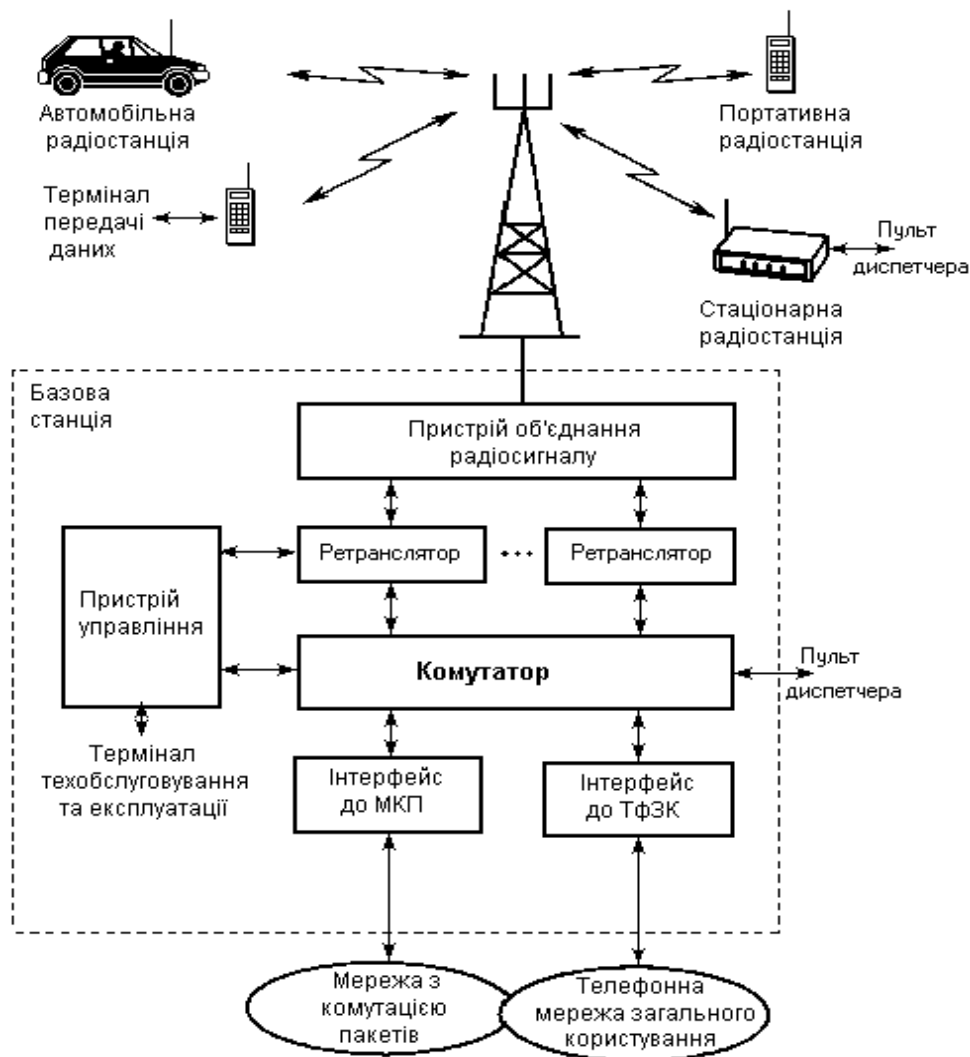


Рис. 7.1. Узагальнена структура однозонавої трекінгової системи

З'єднання з ТфЗК є традиційним для трекінгових систем, але останнім часом усе більш зростає число додатків, що припускають передачу даних, у зв'язку з чим наявність інтерфейсу до МКП також стає обов'язковою.

Термінал технічного обслуговування й експлуатації (термінал ТОЕ) розташовується, як правило, на базовій станції однозонавої мережі. Термінал призначений для контролю за станом системи, проведення діагностики несправностей, обліку тарифікаційної інформації, внесення змін у базу даних абонентів. Переважна більшість трекінгових систем, що випускаються і розроблюються, мають можливість віддаленого підключення терміналу ТОЕ через ТфЗК чи МКП.

Диспетчерський пульт. Необов'язковими, але дуже характерними елементами інфраструктури трекінгової системи є диспетчерські

пульти. Справа в тому, що транкінгові системи використовуються в першу чергу тими споживачами, чия робота не обходиться без диспетчера. Це служби охорони правопорядку, швидка медична допомога, пожежна охорона, транспортні компанії, муніципальні служби. Диспетчерські пульти можуть включатися в систему по абонентських радіоканалах, чи підключатися по виділених лініях безпосередньо до комутатора базової станції. Слід зазначити, що в рамках однієї транкінгової системи може бути організовано кілька незалежних мереж зв'язку, кожна з яких може мати свій диспетчерський пульт. Користувачі кожної з таких мереж не будуть помічати роботи сусідів і, що не менш важливо, не зможуть втручатися в роботу інших мереж.

Абонентське устаткування транкінгових систем містить у собі широкий набір пристроїв. Як правило, найбільш численними є *напівдуплексні радіостанції* (див. рис. 7.2), тому що саме вони найбільшою мірою підходять для роботи в замкнених групах. В більшості це радіостанції з обмеженим числом функцій, що не мають цифрової клавіатури. Їхні користувачі, як правило, мають можливість зв'язуватися лише з абонентами усередині своєї робочої групи, а також посилати екстрені виклики диспетчеру. Проте цього цілком достатньо для більшості споживачів послуг зв'язку транкінгових систем. Випускаються і *напівдуплексні радіостанції із широким набором функцій і цифровою клавіатурою*, але вони, будучи трохи дорожчими, призначені для більш вузького привілейованого кола абонентів.

У транкінгових системах, особливо розрахованих на комерційне використання, застосовуються також *дуплексні радіостанції*, що скоріше нагадують стільникові телефони, але мають значно більшу функціональність у порівнянні з останніми. Як напівдуплексні, так і дуплексні транкінгові радіостанції випускаються не тільки в *портативному*, але й в *автомобільному виконанні*. Як правило, вихідна потужність передавачів автомобільних радіостанцій у 3...5 разів вища, ніж у портативних радіостанцій.

Відносно новим класом пристроїв для транкінгових систем є **термінали передачі даних**. В аналогових транкінгових системах термінали передачі даних - це спеціалізовані *радіомодеми*, що підтримують відповідний протокол радіоінтерфейсу. Для цифрових систем більш характерне вбудовування інтерфейсу передачі даних в абонентські радіостанції різних класів. До складу автомобільного терміналу передачі даних іноді включають і *супутниковий навігаційний приймач системи GPS (Global Positioning System)*, призначений для визначення поточних координат і наступної передачі їх диспетчеру на пульт.

У транкінгових системах використовуються також **стаціонарні радіостанції**, переважно для підключення диспетчерських пультів. Вихідна потужність передавачів стаціонарних радіостанцій приблизно така ж, як в автомобільних радіостанціях.

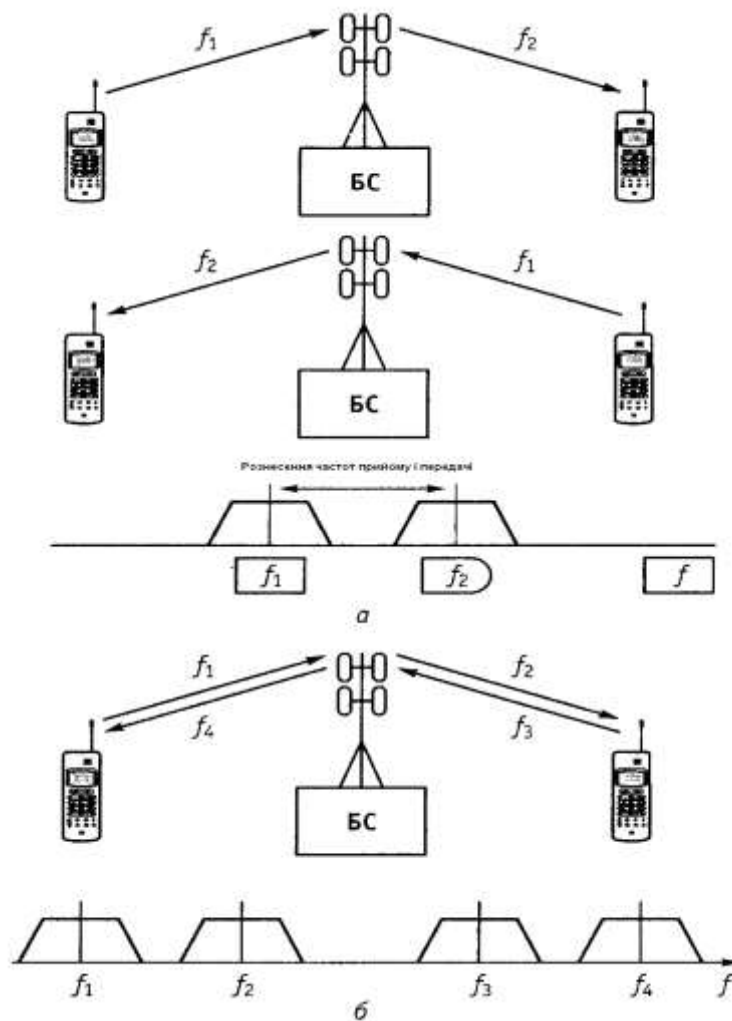


Рис. 7.2. Робота напівдуплексом (а) та дуплексом (б)

В Україні нині дозволена експлуатація двох стандартів аналогового транкінгового зв'язку (*SmartTrunk* та *MPT-1327*) та цифрового стандарту *TETRA*, для яких виділені наступні смуги частот: 150,05-156,7625 МГц, 156,8375-162,75 МГц, 163,2-168,5 МГц, 413-420 МГц, 423-430 МГц.

Отже, можна виділити кілька найважливіших архітектурних ознак, які властиві транкінговим системам:

1. Обмежена і недорога інфраструктура. У багатозонових транкінгових системах вона більш розвинена.

2. Велике просторове охоплення зон обслуговування базових станцій, що викликається необхідністю підтримки групової роботи на великих територіях і вимогами мінімізації вартості системи. При розгортанні транкінгових систем все виходить трохи інакше - обсяг фінансування, як правило, обмежений і для досягнення високої ефективності капіталовкладень потрібно обслужити за допомогою одного комплексу устаткування базової станції більшу територію.

3. Широкий набір абонентського устаткування дозволяє транкінговим системам охопити практично весь спектр потреб корпоративного споживача в рухомому зв'язку.

4. Транкінгові системи дозволяють на базі своїх каналів організувати незалежні виділені мережі зв'язку (чи, як прийнято говорити останнім часом, частки віртуальної мережі). Це означає, що кілька організацій можуть спільними зусиллями розгорнути єдину систему замість установки окремих систем. При цьому досягається відчутна економія радіочастотного ресурсу, а також зниження вартості інфраструктури.

5. Економічне використання радіоспектру.

6. Можливість виходу в інші системи зв'язку (наприклад, в телефонну мережу загального користування).

7. Більш висока оперативність зв'язку (наявність режиму безпосереднього зв'язку між абонентами без базової станції).

Усе сказане вище свідчить про міцність позицій транкінгових систем у корпоративному секторі ринку систем і засобів рухомого зв'язку.

7.3. Транкінгові системи протоколу *SmarTrunk*

До транкінгових систем з децентралізованим керуванням ми відносимо системи, в яких процедура пошуку вільного каналу реалізується за рахунок абонентських радіостанцій, які безупинно послідовно сканують робочі канали транкінгової системи в пошуках сигналу виклику від базової станції (БС) або вільного каналу, на якому можна було б викликати БС.

Однією із перших транкінгових систем із децентралізованим керуванням була система "Алтай" в діапазоні 330 МГц.

Але найбільшу популярність у класі транкінгових систем з децентралізованим керуванням отримали системи із протоколом керування *SmarTrunk*, що був розроблений в 1992 році американською фірмою *Selectone Corporation* (нині *SmarTrunk Systems, Inc.*). За короткий термін від дня своєї появи технологія *SmarTrunk* стала світовим стандартом для недорогих радіотелефонних транкінгових систем.

Протокол *SmarTrunk* пройшов уже кілька циклів розвитку, від аналогового з високошвидкісною *DTMF* маніпуляцією до цифрового *SmarTrunk II* із двопозиційною фазовою маніпуляцією (*BPSK*) і продовжує розвиватися.

Відзначимо, що з дозволу фірми *SmarTrunk Systems* транкінгові системи із протоколом *SmarTrunk* можуть поставлятися і під іншими назвами: *ALTrunk* на апаратурі *Alinco*, *VX-Trunk* (*Yaesu / Vertex*) або *SmarTrunk-B* (zareєстрована торгівельна марка ТОО "Фірма РКК", Москва).

Нижче розглянемо функціонування транкінгових систем із децентралізованим керуванням саме на прикладі *SmarTrunk II*.

Ця система розроблялася як недорога, однозонова, проста в роботі й обслуговуванні система радіо- і радіотелефонного зв'язку. Технічні параметри і відносно низька вартість устаткування *SmarTrunk II* визначили його успішний розвиток і широке поширення. У 1996 р. від

компанії *Selectone* відокремилася нова компанія - *SmarTrunk Systems*, основним напрямком роботи якої є подальший розвиток і просування на ринок системи *SmarTrunk*.

Головними перевагами систем *SmarTrunk* є різноманітні асортименти апаратури, простота переробки звичайних радіостанцій у транкінгові, невибагливість у виборі робочих частот.

Основні експлуатаційні характеристики системи *SmarTrunk II*:

– варіанти смуг частот: у діапазоні метрових хвиль – 138...150 і 150...174 МГц і в діапазоні дециметрових хвиль – 345...375, 403...430, або 430...480 МГц;

– для зв'язку можуть одночасно використовуватися від 2 до 16 дуплексних каналів;

– тип абонентських радіостанцій, що використовуються: напівдуплексні і дуплексні;

– кожний канал може бути підключений до однієї або двох телефонних ліній;

– індикація зайнятості каналу в *SmarTrunk* здійснюється по наявності несучої або по наявності несучої і пілот-тону;

– режими роботи: мобільний абонент – мобільний абонент, мобільний абонент – телефон АТС, телефон АТС – мобільний абонент, груповий зв'язок і спеціальні виклики;

– число абонентів - до 4096 (при використанні контролерів *ST-853*);

– кожній радіостанції призначається персональний номер (до чотирьох цифр) і код для групового зв'язку;

– можуть бути організовані кілька типів викликів: індивідуальний, груповий, загальносистемний, а також екстрений;

– забезпечують до 100 рівнів пріоритету абонентів, причому високопродуктивним абонентам робочі канали надаються за їхньою першою вимогою;

– використання цифрового протоколу сигналізації забезпечує велику дальність зв'язку і високий ступінь захисту системи від спроб несанкціонованого доступу сторонніх абонентів у систему; можливість дистанційного відключення радіостанцій диспетчером у випадку її втрати або крадіжки, для запобігання доступу в систему нелегальних користувачів і порушників;

– захист від перепрограмування радіостанцій 5-значним кодом;

– можливість використання радіостанцій як у транкінговому режимі, так і в режимі звичайної радіостанції.

Додаткові можливості системи *SmarTrunk II*:

– оператором системи може бути організовано до десяти рівнів пріоритету доступу до радіо- і телефонних каналів, що дозволяє абонентам із більш високим рівнем пріоритету в екстрених випадках відключати абонентів із низьким пріоритетом і терміново виходити на зв'язок;

- можливі обмеження окремим абонентам в залежності від рівня пріоритету, часу доступу до системи, виходу на міську або міжміську лінію;
- можлива розбивка абонентів на незалежні групи з роботою всередині груп у режимі "загального ефіру" на рівні керівників груп або всіх абонентів;
- можливе оперативне обмежування доступу окремих абонентів до системи;
- при втраті радіотелефону можливе його негайне блокування або знищення як абонентського для даної системи;
- можлива організація і використання пріоритетного "чергового" каналу для передачі екстрених і особливо важливих повідомлень;
- для забезпечення захисту від прослуховування сторонніми можлива установка в абонентські радіотелефони по необхідності маскіратора (скремблера);
- для додаткового захисту від завад і несанкціонованого доступу в *SmarTrunk* може використовуватись система шумозаглушення з безперервними тонально-кодованими сигналами *CTCSS (Continuos Tone Coded Squelch System)*.

Склад і структура системи *SmarTrunk*

Транкінгові системи *SmarTrunk* складаються з базових станцій і абонентських радіостанцій. До складу кожної базової станції входять **транкінгові контролери, ретранслятори, фільтруюче устаткування** (дуплексні фільтри, комбайнери і т.п.) і **антенно-фідерні пристрої**.

Транкінгові контролери реалізують всі основні алгоритми роботи *SmarTrunk*, а також виконують функції інтерфейсу телефонного каналу.

В якості абонентських пристроїв в *SmarTrunk* використовуються звичайні напівдуплексні або дуплексні ЧМ радіостанції різних виробників, оснащені додатковими логічними модулями.

Привабливою рисою систем *SmarTrunk* є можливість їх поступового модульного нарощування. Базова станція може спочатку бути двох- або трьохканальною й поступово розвиватися аж до 16 каналів.

Структурна схема базового устаткування 4-канальної системи *SmarTrunk II* з контролерами *ST-853* наведена на рис. 7.3.

У цьому випадку застосована класична схема з використанням однієї передавальної й однієї приймальної антени й, відповідно, пристрою об'єднання радіосигналів передавачів (комбайнера) і пристрою розділення радіосигналів для приймачів (розподільної панелі).

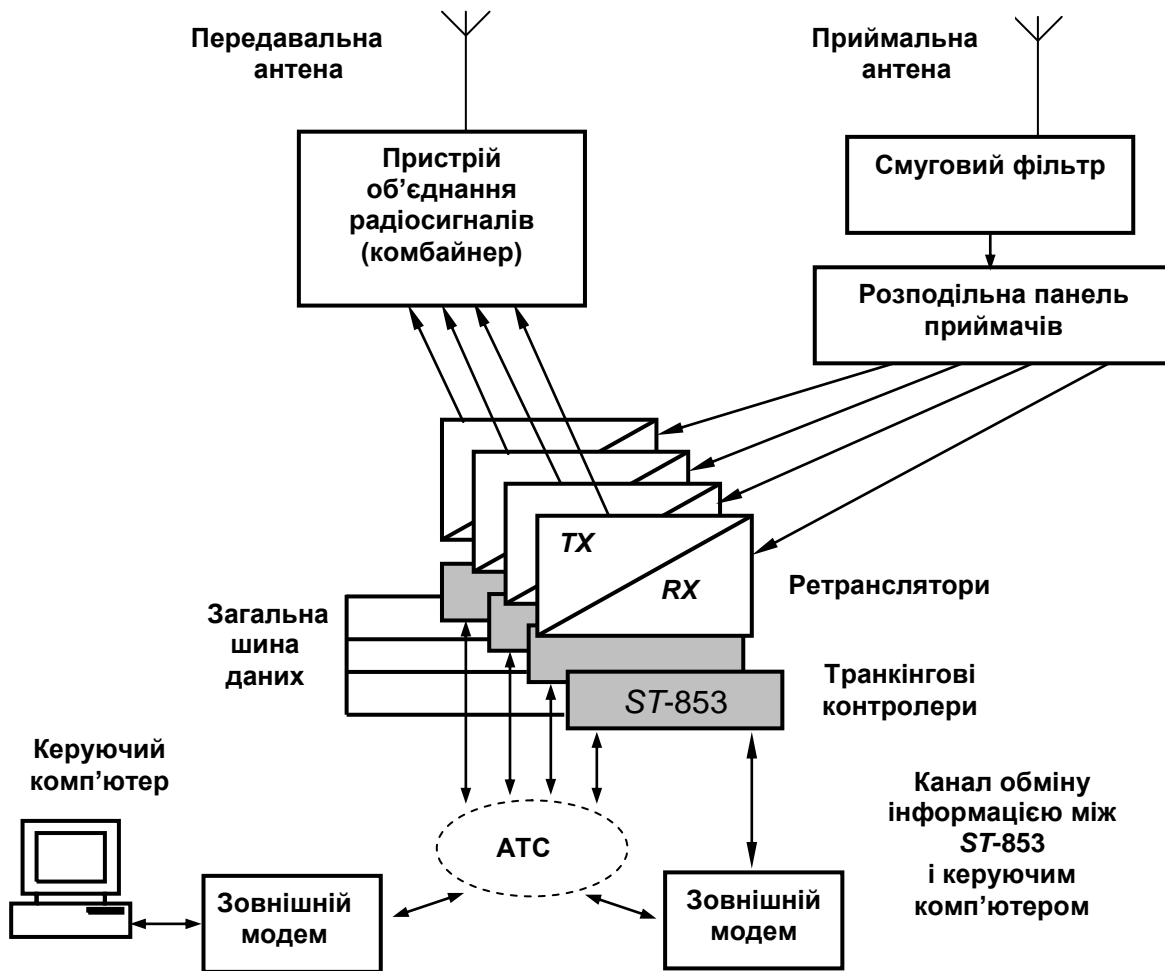


Рис.7.3. Структурна схема базової станції *SmarTrunk I*

Транкінгові контролери *ST - 853*

Центральним елементом системи *SmarTrunk* є **транкінговий контролер**, підключений до ретранслятора робочого каналу. Він відповідає за завантаження свого каналу, виробляє всі керуючі сигнали, визначає, чи може радіоабонент користуватися даним каналом, які його привілеї, у тому числі по виходу в телефонну мережу.

На відміну від колишніх варіантів систем, де контролери *ST-850* або *ST-852* працювали окремо, не будучи зв'язані один з одним, у сучасних системах *SmarTrunk II* контролери *ST-853* зв'язані **загальною шиною даних**, що працює в реальному масштабі часу. Наявність загальної шини даних дозволяє виключити втрати викликів, які мали місце в колишніх версіях систем, запобігає дробленню груп зв'язку при групових викликах.

Керуючий комп'ютер підключається до одного з контролерів *ST-853* базової станції по стандартному стику *RS-232*. Зв'язок з іншими контролерами тієї ж базової станції здійснюється без додаткових перемикачів по загальній шині даних.

Комп'ютер може підключатися до *ST-853* як **безпосередньо**, так і **дистанційно**, через високошвидкісний зовнішній модем (саме цей варіант зображений на рис. 7.3). Дистанційне керування контролерами

базової станції звичайно здійснюється через телефонну мережу з використанням другого аналогічного зовнішнього модему, підключеного до керуючого комп'ютера. Фірма *SmarTrunk Systems* рекомендує використовувати зовнішні модеми моделі *Sportster* виробництва *US Robotics*.

Бази даних

Кожний транкінговий контролер *SmarTrunk* містить дві бази даних – про абонентів транкінгової системи і про сеанси зв'язку, що мали місце на відповідному робочому каналі.

У базі даних абонентів утримуються додаткові номери й системні коди тих, хто може користуватися даним радіоканалом, і основні обмеження для кожного абонента, такі як максимальна дозволена тривалість сеансу зв'язку, дозвіл або заборона на використання телефонних ліній, на вихід у міжміську мережу і т.п.

Обсяг цієї бази даних у контролері *ST-853* доведений до 4096 абонентів і 320 тисяч різних системних кодів. Це зроблено з метою забезпечення “адміністративного роумінгу”, що дає можливість абонентам *SmarTrunk* користуватися послугами декількох різних систем, розташованих у різних населених пунктах.

Спочатку зміст бази даних абонентів формується за допомогою комп'ютера, причому в сучасних системах *SmarTrunk II* це робиться без тривалого відключення базової станції. При формуванні або виправленні бази даних система припиняє обслуговування абонентів лише на короткий час, необхідний для завантаження інформації в один з контролерів *ST-853*. Дані по абонентах можуть бути автоматично завантажені в усі інші контролери базової станції через загальну шину даних. Такий підхід дозволяє менше, ніж за хвилину завантажити дані понад 4000 абонентів в усі контролери 16-канальної базової станції.

Для спрощення переходу від систем *SmarTrunk II* з контролерами *ST-852* на системи з контролерами *ST-853* розроблений спеціальний програмний конвертер.

База даних про сеанси зв'язку через ретранслятор, до якого підключений даний контролер, містить додаткові номери й коди абонентів, що зверталися, оцінки про характер зв'язку (“місто-абонент”, “абонент-місто”, “абонент-абонент”), дату, час і тривалість сеансу зв'язку. Зміст бази даних про сеанси зв'язку необхідний для обліку абонентської плати й тарифікації. На підставі цих даних готуються рахунки за користування послугами зв'язку.

Удосконалені алгоритми передачі даних дозволили істотно зменшити час, необхідний для вивантаження даних про сеанси зв'язку (до 20...40 разів у порівнянні з *ST-852*), і виключити помилки й пошкодження сигналу. Вивантаження даних здійснюється через один із контролерів *ST-853*, які послідовно опитують всі інші контролери базової станції, використовуючи загальну шину даних. При цьому робота системи в цілому не переривається. На час вивантаження даних для

абонентів недоступний тільки один з контролерів, той, з якого в цей момент зчитується інформація.

Вихід у міські АТС

Кожний контролер допускає підключення до нього до двох абонентських телефонних ліній. Звичайно один з виходів контролера підключається до міської АТС, а другий – до місцевої АТС, або до супутникової лінії зв'язку й т.д.

Привілеї в частині виходу в телефонні мережі задаються в базі даних абонентів і включають дозволи або заборони користуватися зовнішніми лініями, заборони на набір певних комбінацій цифр (наприклад, заборона на набір першої цифри "8", тобто заборона міжміських дзвінків) і т.д.

В контролерах ST-853 поліпшена обробка сигналу "зайнято", в результаті чого роз'єднування відбуваються значно швидше і робочі радіоканали звільняються раніше, ніж у системах з контролерами ST-852.

Для забезпечення більш надійної роботи на телефонних мережах з імпульсним набором у контролерах ST-853 застосований удосконалений детектор "клацань", що вимагає набору додаткової цифри "0" перед додатковим номером абонента, який викликається. Ця цифра "0" використовується контролером як навчальна послідовність і забезпечує високу вірогідність розпізнавання наступних цифр навіть на телефонних лініях низької якості.

З метою забезпечення кожному абонентові системи *SmarTrunk* прямого міського номера, у складі базової апаратури має бути спеціальний пристрій – конвертер двопроводових абонентських ліній в 3-х проводіві сполучні лінії. При цьому оператор системи *SmarTrunk* повинен орендувати на місцевій АТС відповідну номерну ємність.

Організація зв'язку

Зв'язок між рухомими абонентами в системі *SmarTrunk* організується в такий послідовності. Після включення живлення кожна абонентська радіостанція починає послідовно переглядати (сканувати) всі запрограмовані в ній радіоканали в пошуках викличного сигналу. При виявленні свого викличного коду вона припиняє сканування й подає звуковий сигнал, сповіщаючи власника про надходження виклику. Після цього починається діалог між абонентами.

При необхідності викликати будь-якого з абонентів мережі по радіоканалу або вийти в міську телефонну мережу, потрібно набрати на клавіатурі номер радіоабонента або телефонний номер, а також маршрутний код виклику (два символи, що показують системі, який вид виклику потрібен). Вся ця інформація потім одночасно передається в ефір одним пакетом. У диспетчерському режимі для зв'язку зі своєю групою досить нажати на тангенту.

Абонентська радіостанція послідовно сканує доступні радіоканали і, знайшовши вільну частоту, забезпечує зв'язок з ретранслятором базової станції. Відразу ж після цього здійснюється набір міського телефонного номера або випромінюється в ефір додатковий номер рухомого абонента. Після відповіді абонента можна вести розмову.

Щоб подзвонити рухомому абоненту з міського телефону, треба набрати телефонний номер одного з ретрансляторів системи і після звукового сигналу з'єднання набрати додатковий номер потрібного абонента (бажано в тональному режимі). Після відповіді можна вести звичайну телефонну розмову.

Якщо абонент не відповідає, або якщо в нього виключена радіостанція, то абонент, який дзвонить, почує сигнал "зайнято". Контролери ST-853 забезпечують різні за тривалістю сигнали "зайнято", що дозволяє зрозуміти, чи зайнятий потрібний абонент, або він недоступний (перебуває за межами зони обслуговування, не включив свою радіостанцію тощо).

Якщо система *SmarTrunk* має кілька місць розташування базових станцій і місце розташування викликуваного абонента заздалегідь невідоме, у випадку сигналу недоступності можна спробувати знайти його в зоні дії інших ретрансляторів.

Процедури встановлення зв'язку

У випадку, коли ініціатором виклику в системі *SmarTrunk II* є базова станція (наприклад, коли абонент АТС намагається викликати мобільного абонента), процедура встановлення зв'язку виглядає таким чином. Базова станція посилає в ефір цифровий "кадр виклику", структура якого наведена нижче:

Синхросигнал (1400 Гц тривалістю 275 мс +[(n + 1)×150 мс])	Тип виклику	Системний код абонента	Ідентифікатор системи	Контрольна сума (КС)
--	----------------	---------------------------	--------------------------	-------------------------

Тривалість синхросигналу частотою 1400 Гц залежить від числа робочих каналів "n" і може становити від 725 мс для 2-канальної системи до 2825 мс для 16-канальної системи.

Синхросигнал змушує всі абонентські радіостанції, що прийняли його, зупинити сканування на час до одержання залишку "кадру виклику". Після цього на каналі залишається тільки та радіостанція, що має потрібний системний код абонента, а інші продовжують сканування.

Ця радіостанція посилає на базову станцію відповідний пакет даних, утримуючий її системний код, і подає мобільному абоненту звуковий сигнал про виклик, що надійшов. Абонент повинен відреагувати натисканням клавіші „*” (зірочка) на клавіатурі радіостанції, в результаті чого та передає в ефір цифровий "кадр відповіді", і з'єднання вважається встановленим. Далі два абоненти системи починають переговори в напівдуплексному або дуплексному режимі.

По закінченню переговорів мобільний абонент повинен натиснути клавішу „#” (решітка), у результаті чого його радіостанція передасть в ефір цифровий “кадр відбою” і продовжить сканування каналів.

Якщо ініціатором виклику в системі *SmarTrunk II* є абонентська радіостанція, вона намагається знайти вільний радіоканал (по відсутності на ньому несучої або пілот-тону) і передається цифровий “кадр запиту”, що має наступну структуру:

Синхросигнал	Системний код абонента	Ідентифікатор системи	Маршрутний код	Телефонний номер або додатковий абонента	КС
--------------	------------------------	-----------------------	----------------	--	----

Базова станція, прийнявши “кадр запиту” від абонентської радіостанції, передає у відповідь “кадр рукостискання”, що підтверджує встановлення зв'язку, а далі все відбувається, як було описано вище для викликів, що ініціює базова станція.

Базове обладнання

Як уже було сказано, фірма *SmarTrunk Systems* виробляє для систем *SmarTrunk* тільки транкінгові контролери та логічні модулі для декількох моделей абонентських радіостанцій. Таким чином, не доводиться говорити про якісь комплектної поставки системного обладнання з боку *SmarTrunk Systems*. Завдання підбору потрібного обладнання лягає на плечі постачальника (системного інтегратора), і якість виконання системи *SmarTrunk* в остаточному підсумку визначається досвідом і кваліфікацією цього системного інтегратора.

Вибір базового обладнання для систем *SmarTrunk* досить широкий, від недорогих ретрансляторів *Kenwood TKR-820* до високоякісних, але досить дорогих *Tait T800* і *Motorola MTR 2000*.

Зрозуміло, що замовники, що вибирають *SmarTrunk*, піклуються про дешевизну системи. Однак у випадку багатоканальних транкінгових систем прагнення гранично здешевити базове обладнання може зіграти злий жарт із замовником, ще раз продемонструвавши справедливість приказки “скупий платить двічі”.

Справа в тому, що недороге базове обладнання, у тому числі й відомі ретранслятори *GR300* і *GR500* фірми *Motorola*, випускається розраховуючи на використання в системах двочастотного симплексу (або, як тепер іноді говорять, у системах “конвенціонального” радіозв'язку). Активність абонентів у таких системах не дуже висока, а ретранслятори, як правило, розташовуються в приміщеннях базових станцій поодиноці, тобто випадки, коли по сусідству випромінює інший ретранслятор, вкрай рідкі.

У випадку транкінгових систем ретранслятори свідомо групуються разом у приміщенні базової станції, причому сама система стежить, щоб кожний з ретрансляторів працював з повним навантаженням. Таким чином, ситуації, коли в одному приміщенні одночасно працюють на передачу кілька ретрансляторів, стають правилом, а не виключенням.

Зрозуміло, що електромагнітну обстановку в приміщеннях базових станцій транкінгових систем (не тільки систем *SmarTrunk*) варто характеризувати як важку. У цих обставинах застосування дешевих ретрансляторів, а також відсутність добротних фільтрів, комбайнерів і т.п. може привести до неприємних наслідків.

Так, відносно ретрансляторів *Kenwood TKR-720* і *TKR-820* давно було відзначено, що їх краще не застосовувати в системах *SmarTrunk*, що мають більше трьох каналів, тому що динамічний діапазон прийомного тракту цих ретрансляторів явно недостатній для роботи в умовах важкої електромагнітної обстановки.

Але виявляється, що ретранслятори *TKR-720* і *TKR-820* краще не застосовувати й у малоканалних системах *SmarTrunk*, тому що навантаження на кожний канал у таких системах, як правило, дуже високе, і дешеві ретранслятори його просто не витримують – у них дуже швидко виходить із ладу підсилювач потужності передавача, що не розрахований на такі навантаження!

Тому потрібно з усією серйозністю ставитися до вибору ретрансляторів для транкінгових систем і не зневажати пропозиціями придбати той або інший ретранслятор “із 100% робочим циклом”, тобто здатний тривало працювати в режимі передачі, хоча такі ретранслятори можуть коштувати в 2-3 рази дорожче інших моделей.

Найбільш розумним вибором для систем *SmarTrunk*, що мають 4 канали й більше, представляються ретранслятори *Tait T800* або *Kyodo KG-110* (інша його назва *Forward MS-101*), а в окремих випадках *Vertex VXR-5000*.

Для малоканалних систем, що не мають перспектив подальшого розвитку, можна рекомендувати ті ж *VXR-5000*, а також ретранслятори *Motorola GR-500*, виконані на базі двох радіостанцій *GM300* або *GM350* потужністю до 25 Вт.

Крім ретрансляторів, потрібно особливо відповідально підійти до вибору фільтруючого устаткування базової станції – дуплексних і смугових фільтрів, комбайнерів, розподільних панелей. І тут прагнення гранично здешевити базове обладнання може привести до негативних ефектів у процесі експлуатації, що виражається як у завадах на прийомних частотах від власних базових передавачів, так і в різкому погіршенні параметрів системи із часом, якщо було використано здешевлене фільтруюче обладнання від другорядних виробників.

Крім того, необхідно підкреслити важливість попереднього розрахунку комбінаційних частот для кожної базової станції, що обов'язково повинен виконуватися на етапі проектування системи з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

Якщо в результаті розрахунків виявиться, що якась комбінаційна частота лежить поруч із прийомними частотами базової станції, то єдиним засобом позбутися від завад може виявитися рішення про

перенос обладнання одного або декількох робочих каналів в інше приміщення.

Для систем *SmarTrunk*, де зайнятість каналу визначається по наявності в ньому несучої, більші неприємності можуть принести й комбінації, частоти яких лежать близько до тих або інших частот передачі базової станції. У таких випадках уражені канали базової станції будуть набагато рідше займатися абонентськими станціями, тобто навантаження на інші канали зростуть, і пропускна спроможність системи в цілому погіршиться.

Попередні розрахунки комбінаційних частот допоможуть уникнути цих неприємностей ще на етапі проектування й забезпечать максимальну ефективність створюваної системи *SmarTrunk*.

Абонентське обладнання

У транкінгових системах з децентралізованим керуванням абонентські радіостанції відіграють головну роль у реалізації транкінгового протоколу. У системах *SmarTrunk* і *SmarTrunk II* абонентські радіостанції безупинно й послідовно сканують робочі канали транкінгової системи в пошуках сигналу виклику або вільного каналу для базової станції.

Придатність тих або інших моделей абонентських радіостанцій для використання в системах *SmarTrunk* визначається наявністю для них логічних модулів, які розробляються фірмою *SmarTrunk Systems*. Будучи встановленим у радіостанцію, логічний модуль бере на себе керування всіма її основними функціями, включаючи сканування, включення на передачу й керування роботою шумоподавлювача. Програмування логічних модулів абонентських радіостанцій виконується власником системи або постачальником. Радіостанції захищаються від перепрограмування спеціальним секретним кодом.

Критеріями відбору тих або інших моделей радіостанцій для *SmarTrunk Systems* є насамперед здатність станції досить швидко сканувати робочі канали (час перемикання повинен бути не більше 150 мс), а також популярність, якість і вартість радіостанції.

Природно, що в числі радіостанцій, для яких є модулі *SmarTrunk*, у першу чергу варто згадати досить дешеві моделі японських фірм *Alinco*, *Yaesu/Vertex*, *Kenwood* і *Standard*. Однак надзвичайна популярність більш дорогих радіостанцій *Motorola* змусила *SmarTrunk Systems* з першого дня існування систем *SmarTrunk* мати в асортименті логічні плати для радіостанцій як *GP300*, *GM300*, а згодом і для *GP50*, *GP68* і *GM350*. Свідченням безсумнівної популярності *SmarTrunk* є те, що *Motorola* включила устаткування *SmarTrunk* у свої преїскуранти як стандартне для створення недорогих транкінгових систем.

У зв'язку з вимогою наявності повнодуплексних абонентських радіостанцій у системах *SmarTrunk*, яким дозволене підключення до телефонних мереж загального користування, варто згадати про існуючі

моделі такого обладнання. Це, радіостанції, насамперед, *TM-MDT25* (*Telemobile*), *KG-106* (*Kyodo*) і, що швидко набирає популярність, серія 9200 фірми *Seiki*. Ці ж радіостанції можуть використовуватися й у стаціонарному варіанті.

Переносні дуплексні радіостанції для систем *SmarTrunk* відсутні, за винятком дводіапазонних моделей *Alinco* і деяких інших фірм. На жаль, у цей час регламентуючі документи не передбачають можливостей створення транкінгових систем, прийомні частоти яких лежали б, наприклад, у діапазоні 450 МГц, а передавальні – у діапазоні 160 МГц.

У складі однієї і тієї ж системи *SmarTrunk* можуть одночасно використовуватися абонентські радіостанції різних виробників. Всі вони будуть реалізувати основні функції протоколу *SmarTrunk*.

У той же час, окремі радіостанції можуть надавати абонентові більше зручностей, що пов'язано з особливостями їхніх внутрішніх мікропроцесорів. Так, портативна радіостанція *GP300* до останнього часу була єдиною, де можна було програмувати перемикальні “банки каналів”, тобто вибирати той або інший набір сканувальних частот. Зараз аналогічні можливості мають портативна радіостанція *VX-10* (*Vertex*) і кілька переносних моделей та радіостанцій фірми *Icom*.

Наявність “банків каналів” у випадку багатозонових систем *SmarTrunk* дасть можливість абонентові вибирати ту або іншу базову станцію, або переходити в режим звичайного радіозв'язку при виході із зони дії транкінгової системи.

У логічних модулях нового покоління реалізована також ідея наявності не двох, а трьох різних системних кодів у кожного абонента, що дозволяє забезпечити не тільки індивідуальні й групові виклики, але й загальносистемні виклики на випадок передачі яких-небудь важливих повідомлень.

Для використання можливостей *SmarTrunk II* у системах сільської радіотелефонії й інших “фіксованих” додатках розроблені модулі серії *ST-869*, що сполучають функції логічного модуля *SmarTrunk* і телефонного інтерфейсу.

Модуль *ST-869* дозволяє підключати звичайний телефонний апарат до симплексної або до дуплексної радіостанції й управляти її роботою із клавіатури телефону. При використанні дуплексної радіостанції *ST-869* забезпечується зв'язок як при звичайній телефонній розмові. При використанні симплексної радіостанції зв'язок буде напівдуплексний, але й тут *ST-869* надасть зручності за рахунок вбудованої системи *VOX*, яка автоматично включає абонентську радіостанцію на передачу від голосу оператора й переводить її на прийом по закінченню чергової фрази. Натискання на тангенту не буде потрібним.

Модулі *ST-869* забезпечують рівень гучності звукового сигналу виклику, достатній для роботи телефонів і факс-модемів в автоматичному режимі. Є рекомендації фірми *SmarTrunk Systems* по

виготовленню дуплексної стаціонарної радіостанції на базі двох симплексних радіостанцій GM300 з використанням ST-869.

7.4. Транкінгові системи протоколу MPT 1327

У 1988 році був прийнятий відкритий стандарт аналогового транкінгового зв'язку MPT 1327, що створений у Великобританії Міністерством пошт і телекомунікацій (MPT - *Ministry of Post and Telecommunication*). Цей стандарт головним чином визначає протоколи сигналізації і може бути використаний на інших мережах PMR і PAMR для з'єднання мобільних абонентів з абонентами ТфМЗК (PSTN).

Основними виробниками обладнання, що відповідає протоколам MPT є різні компанії світу (*Motorola, Ericsson, Philips, Bosch, Nokia, GEC Markoni* та ін.).

Склад протоколів, які були прийняті впродовж різних періодів з 1981 по 1988 рр. є досить різноманітний за функціями, що виконуються, і за призначенням.

Як уже відмічалось, найбільш широке застосування знайшов прийнятий в 1987р. стандарт MPT 1327. У цьому протоколі працюють такі системи:

- *Fylde* (Великобританія);
- *Taitnet* (Нова Зеландія);
- *ACCESSNET* (Німеччина);
- *ACTIONET* (Фінляндія);
- *Zetron* (США).

Системи протоколу MPT 1327 будуються з *виділеним каналом управління*, в якості якого використовується один з каналів базової станції. По цьому каналу у цифровій формі передаються команди управління та деякі види даних. Інші канали базової станції є робочими каналами, які призначені для передачі мови та даних довільної довжини. Службова інформація і короткі блоки даних передаються по каналу керування у цифровому вигляді, а мовні повідомлення, як правило, в аналоговому. Однак сьогодні існують і цілком цифрові системи, реалізовані на базі протоколу MPT 1327, наприклад, система *ACCESSNET-D* компанії *Rohde & Schwarz*.

Спочатку протокол MPT 1327 розроблявся для *діапазону частот* 174...225 МГц, а потім були освоєні й інші ділянки частот, а саме: 146...174, 300...344, 400...512 і 800 МГц.

У відповідності до цього стандарту передавач базової станції повинен забезпечити формування радіоканалів з частотним розподілом (FDMA) та *рознесенням частот 12,5 кГц* між каналами. Допустиме відхилення частоти відносно номінального значення не повинно перевищувати $\pm 1\text{кГц}$. Для передачі мови використовується частотна модуляція. Максимальна *девіація частоти* не повинна перевищувати $\pm 2,5\text{кГц}$.

Для передачі дискретних повідомлень сигнальної інформації зі швидкістю 1200 біт/с використовується *FFSK* („швидка частотна маніпуляція“), що є варіантом частотної маніпуляції з мінімальним зсувом (*MSK*) для каналів тональної частоти (0,3...3,4 кГц). Для передачі логічних «0» та «1» застосовують частоти 1200 Гц та 1800 Гц.

Серед переваг протоколу *MPT 1327* можна виділити наступні:

- можливість побудови багатозонових систем національного масштабу з великою кількістю базових станцій, що дозволяє "покривати" значні території;
- широкий вибір абонентського і базового устаткування *MPT 1327*; його випускають багато фірм - *Motorola, Tait Electronics, Fylde Microsystems, Bosch, Philips, Nokia, Rohde & Schwarz* та інші;
- відсутність жорстких вимог до відповідності каналів і частот, що дозволяє призначати канали по існуючому частотному плану і відповідному дозволу частотного ДП "Українського державного центру радіочастот";
- стандартизація компонентів системи, що спрощує і знижує вартість експлуатації, обслуговування, розвитку й об'єднання мереж у більш великі системи зв'язку;
- можливість економічної передачі коротких повідомлень, що дуже важливо для реалізації функцій аварійного оповіщення і навігації;
- можливість будувати ефективні мережі збору інформації від датчиків станів.

Можливості, які надаються абонентам

Системи на базі протоколу *MPT 1327* дещо розширюють "джентльменський набір" послуг стільникових систем зв'язку. Це не тільки індивідуальний виклик мобільної радіостанції і з'єднання з абонентами міської і відомчої телефонних мереж, але і виклик, який тільки повідомляє (абоненти, що викликаються, можуть лише слухати інформацію), виклик групи абонентів, пріоритетний і аварійний виклики, вкладений виклик (підключення інших абонентів до розмови, що ведеться), переадресація користувачем радіостанції вхідних викликів на іншого абонента. Крім того, апаратура транкінгової мережі забезпечує постановку викликів на чергу і захист від несанкціонованого доступу.

Види зв'язку

Протокол *MPT 1327* передбачає наступні види зв'язку:

- голосовий зв'язок - індивідуальний, груповий, пріоритетний; забезпечуються режими загальної розмови й оповіщення (говорить абонент, який викликає, інші слухають);
- передача даних - необмежена довжина, пріоритетна передача, груповий обмін (додаткові специфікації містяться в документі *MAP 27*);
- аварійний виклик - виклик із максимальним пріоритетом, голосовий зв'язок, передача даних, груповий виклик із можливістю відповіді;

- зв'язок із підключенням - сеанс двох абонентів, у якому забезпечується можливість групового виклику; може застосовуватися для організації конференцзв'язку і переадресування викликів;
- статусні повідомлення - до 30 статусних повідомлень довжиною 5 біт (не забезпечується передача статусних повідомлень групам абонентів системи, абонентам відомчої АТС або міських АТС);
- короткі блоки даних - цифрові повідомлення до 184 біт, які передаються по каналу керування;
- у багатьох системах на базі *MPT 1327* реалізована можливість передачі по каналу керування (*Extended Data Messages*) розширених блоків даних, скомпонованих у чотири короткі блоки загальним розміром до 736 біт.

Керування системою. Протокол *MPT 1327* передбачає передачу сигналів зі швидкістю *1200 бим/с* у стандарті **FFSK** (*Fast Frequency Shift Keying* - швидка частотна маніпуляція), що може застосовуватися як для дуплексних БС, так і для напівдуплексних абонентських радіостанцій. Використання сигналізації в дуплексних абонентських терміналах не є обов'язковою вимогою протоколу *MPT 1327*, але передбачене в багатьох реалізаціях систем. Всі команди, що передують на початку зв'язку, передаються по каналу керування. У випадку виникнення несправності передбачена можливість переходу системи в аварійний режим; алгоритм переходу і перелік системних операцій визначаються при реалізації конкретної системи.

Опрацювання викликів. У системах на базі протоколу *MPT 1327* підтримується формування черг на обслуговування, виклики в яких обробляються за правилом *FIFO* з обліком пріоритетів. Встановлено три типи пріоритетів: нормальний, високий і аварійний. Система опрацювання викликів забезпечена засобами для швидкого звільнення робочих каналів після закінчення зв'язку або при втраті радіоконтакту. Для захисту від несанкціонованого доступу транкінговий процесор запитує в абонентській радіостанції її електронний серійний номер (*ESN*), який записаний у мікропроцесорі при виготовленні, і порівнює його з інформацією, що міститься в базі даних усіх БС системи. При розбіжності номера *ESN* у радіостанцію надходить команда на відключення.

Ємність системи. Специфікації протоколу *MPT 1327* дають можливість одержати наступні максимальні значення параметрів транкінгової системи:

- 1 036 800 абонентських адрес;
- 32 768 ідентифікаційних кодів;
- 1024 каналів транкінгу.

Відповідно до розмірів цих параметрів системи підрозділяються на *регіональні* (до 16 зон у кожній системі) і *національні* (максимум 2 підсистеми по 512 зон кожна).

Остання, гігантська, мережа поки ніде не реалізована. Однією із самих великих систем, розроблених на базі *MPT 1327*, є мережа *Chekker Network*, що належить *Deutsche Telekom*. У цій мережі використовується устаткування *ACCESSNET* фірми *Rohde & Schwarz*, сьогодні вона нараховує приблизно 900 каналів, 160 БС і приблизно 62 тис. абонентів (у її складі - декілька транкінгових систем).

Як правило, транкінгові системи на базі протоколу *MPT 1327* створюються для охоплення 1...2 тис. абонентів і розраховані на 3...5 базових станцій із 3...8 каналами на кожній із них.

Реалізації *MPT 1327*. В даний час існують декілька схемо-технічних рішень, що реалізують функції протоколу *MPT 1327*. Найбільше розповсюдження одержали дві схеми, що визначають архітектуру транкінгового контролера, - із **розподіленою і централізованою обробкою інформації**.

Розподілена архітектура була розроблена фірмою *Fylde Microsystems* біля 20 років тому. Системи з розподіленою обробкою інформації призначені для забезпечення двостороннього радіозв'язку і використовуються при створенні систем регіонального рівня. До них відносяться транкінгові системи ***Fylde Microsystems*** та ***Taitnet***. Перевагою таких системи є відносно невисока вартість устаткування. Однак при збільшенні числа регіональних вузлів і необхідності якісної зміни спектра послуг, потрібне більш дороге устаткування, вартість якого в 4...6 разів вища.

Централізована обробка інформації реалізована, зокрема, у системі *ACCESSNET* компанії *Rohde & Schwarz* і системі *Actionet* фірми *Nokia*. Ці системи дозволяють побудувати транкінгову мережу практично будь-якої топології (як регіонального, так і національного масштабу) - навіть структуру, що містить в собі декілька багаторівневих "зірок" із довільним з'єднанням периферійних вузлів. Єдине обмеження для розширення мережі - потужність транкінгового контролера, що, однак, можна нарощувати без модернізації всього устаткування.

ВИСНОВКИ:

– однозонові і невеликі багатозонові мережі з централізованим керуванням і підключенням до АТС найбільш доцільно будувати на базі системи *TAITNET*; крім того, ці мережі відрізняє невисокий об'єм початкових інвестицій;

– складні багатозонові мережі (у яких зони в значній мірі автономні, і існує необхідність в їхньому підключенні до різних АТС) доцільно будувати на базі системи *ACCESSNET*.

Система *TAITNET*.

До систем з розподіленою обробкою інформації відносяться, насамперед, контролери транкінгових систем *Fylde Microsystems* і *Taitnet*. Принцип організації керування в системах *Fylde* і *Taitnet* регіонального рівня зображений на рис. 7.4.

Кожний ретранслятор транкінгового каналу (TX/RX) має спеціальний модуль керування каналом (МКК), що монтується на загальній з ним апаратній рамі. Всі модулі МКК базової станції (БС) об'єднані високошвидкісною шиною даних, що поєднує їх із блоком керування сотої (БКС). У свою чергу всі блоки БКС з'єднані з контролером регіонального вузла (КРВ), що крім функцій керування забезпечує також стикування з установчими й міськими АТС.

На рис. 7.4 зображена максимально можлива конфігурація системи *Fylde* або *Taitnet* регіонального рівня – до 10 зон, кожна з яких являє собою одну БС, що має від 2 до 24 дуплексних каналів. Один з каналів кожної БС є каналом керування (КК), а інші – робочими каналами для голосового зв'язку або передачі даних довільної довжини.

Кожний МКК може самостійно виконувати деякі функції протоколу *MPT 1327*, яких, у принципі, досить, щоб підтримувати роботу даного каналу в транкінговій системі, навіть якщо все інше керуюче устаткування вийде з ладу.

В автономному режимі МКК дозволяє забезпечити:

- локальний (у межах зони обслуговування даної базової станції) голосовий зв'язок і передачу даних довільної довжини;
- локальну передачу статусних повідомлень;
- локальну передачу коротких блоків даних довжиною до 184 біт;
- при наявності в працездатному стані більше ніж одного каналу – постановку в черзі на заняття робочого каналу й на зв'язок з конкретним радіоабонентом;
- опитування вбудованих у ретранслятор датчиків і індикацію несправностей.

Працюючи автономно, модулі МКК використовують заздалегідь зашиті в їх ПЗУ параметри, змінити які можна тільки з використанням ультрафіолетової лампи й програматора.

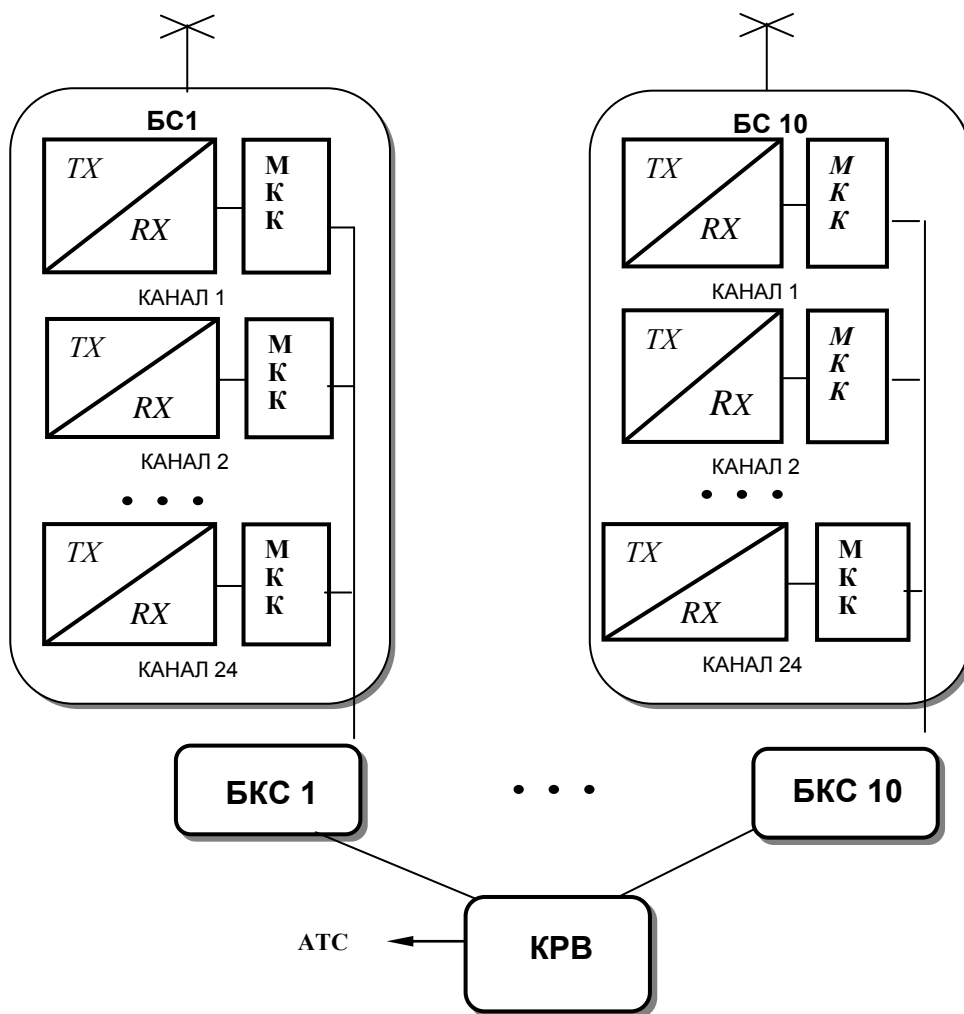


Рис. 7.4. Організація керування у транкінгових системах *Fylde Microsystems i Taitnet*

На додаток до функцій МКК, перерахованих вище, *блок керування стільником* (БКС) забезпечує:

- визначення повноважень радіоабонента (перевірку “свій-чужий”) перед тим, як надати йому робочий канал;
- нагромадження інформації про сеанси зв'язку через дану базову станцію;
- підготовку статистичної інформації із завантаження каналу за останні 24 години;
- можливість з'єднання БКС із *контролером регіонального вузла* (КРВ).

Основне завдання БКС – забезпечити зв'язок всіх МКК із “зовнішнім світом”. Звичайно такий зв'язок здійснюється через КРВ, до якого, у свою чергу, підключається комп'ютерний термінал адміністратора транкінгової системи. Однак у випадку однієї зонової системи, для якої не потрібні виходи на АТС, КРВ можна не використовувати, а термінал адміністратора системи підключити безпосередньо до БКС.

КРВ у транкінгових системах *Fylde i Taitnet* представляє такі додаткові можливості:

- вихід у телефонні мережі загального користування (міські АТС);
- вихід в установчі АТС;
- підключення лінійних пристроїв (ЛП), що дозволяють виходити в транкінгову мережу без використання абонентської радіостанції;
- переадресацію вхідних викликів;
- можливість з'єднання КРВ з міжрегіональним контролером (*Fylde*) або з іншими КРВ (*Taitnet*).

КРВ в системах *Fylde* і *Taitnet* містить спеціалізований комп'ютер, що обробляє керуючу інформацію, цифровий контролер ТЧ-сигналів на базі ще одного комп'ютера, цифровий ІКМ-комутатор і блоки інтерфейсів з телефонними лініями. До КРВ підключається термінал адміністратора транкінгової системи.

У тому, що системи *Fylde* і *Taitnet* на регіональному рівні дуже схожі одна на одну, немає нічого дивного, адже із самого початку розробок транкінгових систем *MPT 1327* ці дві фірми співробітничали. Аж до 1995р. *Tait Electronics* використовувала транкінгові контролери виробництва *Fylde*, поставляючи свої ретранслятори й абонентські радіостанції. Однак до теперішнього часу фірма *Tait* розвинула програмне забезпечення своєї версії системи *MPT 1327*, стала використовувати свої назви керуючих модулів, а для більших систем національного рівня застосувала підхід, що відрізняється від підходу фірми *Fylde Microsystems*.

Відмінності на рівні регіональних вузлів, багатозонових систем, а також у термінології будуть описані у відповідних розділах, присвячених системам *Fylde* і *Taitnet*.

Весь комплекс устаткування системи *TAITNET* виробляється фірмою *Tait Electronics* (Нова Зеландія).

Інфраструктура системи *TAITNET* містить у собі:

- центр(и) регіонального керування з терміналом(ами) керування системою;
- базові станції;
- абонентське устаткування.

Процесор регіонального керування *T1530* здійснює об'єднання контролерів *T1510* базових станцій у єдину багатоканальну багатозонову систему радіозв'язку, що складається з 10 зон по 24 канали в кожній, і керує нею. Він збирає інформацію з усіх БС і передає її на термінал керування системою.

Більш сучасний процесор регіонального керування *T1540* здатний керувати мережею з 16 зон по 24 канали в кожній, і забезпечувати об'єднання до 32 зон у єдину міжрегіональну систему. *T1540* використовує в якості платформи робочу станцію *SUN Sparc Classic* (з ОС *UNIX*) фірми *SUN Microsystems*.

Устаткування базових станцій складається з антенно-фідерного устаткування, ретрансляторів *T800*, каналних контролерів *T1510* і системного інтерфейсу *T1520*. Кількість ретрансляторів *T800* і

контролерів T1510 дорівнює числу каналів трафіку плюс один для каналу керування. Контролер T1510 підтримує сеанс зв'язку і взаємодіє із системним інтерфейсом T1520, що виконує перевірку і облік з'єднань, збирає інформацію про стан системи і здійснює обмін даними з контролерами T1510. Зв'язок T1520 і процесора регіонального керування T1530 реалізується або через інтерфейс RS232, або через модем T902-15 (при використанні виділених двопроводових ліній).

Система ACCESSNET.

До класу систем з централізованою обробкою інформації відносяться контролери транкінгових систем ACCESSNET, розроблені фірмою *Rohde & Schwarz*, контролери ACTIONET фірми *Nokia* і деякі інші. Принципи організації керування в таких транкінгових системах досить близькі до принципів керування в комп'ютерних мережах. Ця система забезпечує широкий набір сервісних функцій, серед яких - унікальні для транкінгових систем. Зокрема, підтримуються прямий набір номера при сполученні з мережами ISDN, режим "поштової скриньки", моніторинг системи і відображення інформації в графічному вигляді, є можливість організації пейджингового зв'язку. Безсумнівна перевага системи ACCESSNET – можливість устаткування адаптуватися до будь-яких умов застосування.

Розглянемо принцип побудови на прикладі системи ACCESSNET (рис. 7.5). Всі функції керування в системах ACCESSNET зосереджені в транкінгових контролерах, які в *Rohde & Schwarz* називаються MMX (скорочення від *Mobile-Mobile eXchange*, що можна перекласти як "Комутатор мобільних абонентів").

Є кілька рівнів контролерів MMX, починаючи від аналогових MMX-4plus, MMX-8, MMX-24, де цифри означають кількість слотів (посадкових місць) для інтерфейсних блоків, і закінчуючи сімейством цифрових контролерів MMX-64 (від MMX-64/16 до MMX-64/96).

Принципи побудови для всіх контролерів однакові. У кожному з них є потужний спеціалізований процесор на базі промислового комп'ютера, а також два різновиди інтерфейсних блоків – для зв'язку з радіоканалами й міжзонових з'єднань (LIA) і для зв'язку з телефонними лініями (PIA). Кількість базових станцій (БС), що підключаються до одного транкінгового контролера, і кількість каналів у кожній із БС обмежується тільки побажаннями замовника й потужністю контролера, що використовується (кількістю слотів для інтерфейсних блоків).

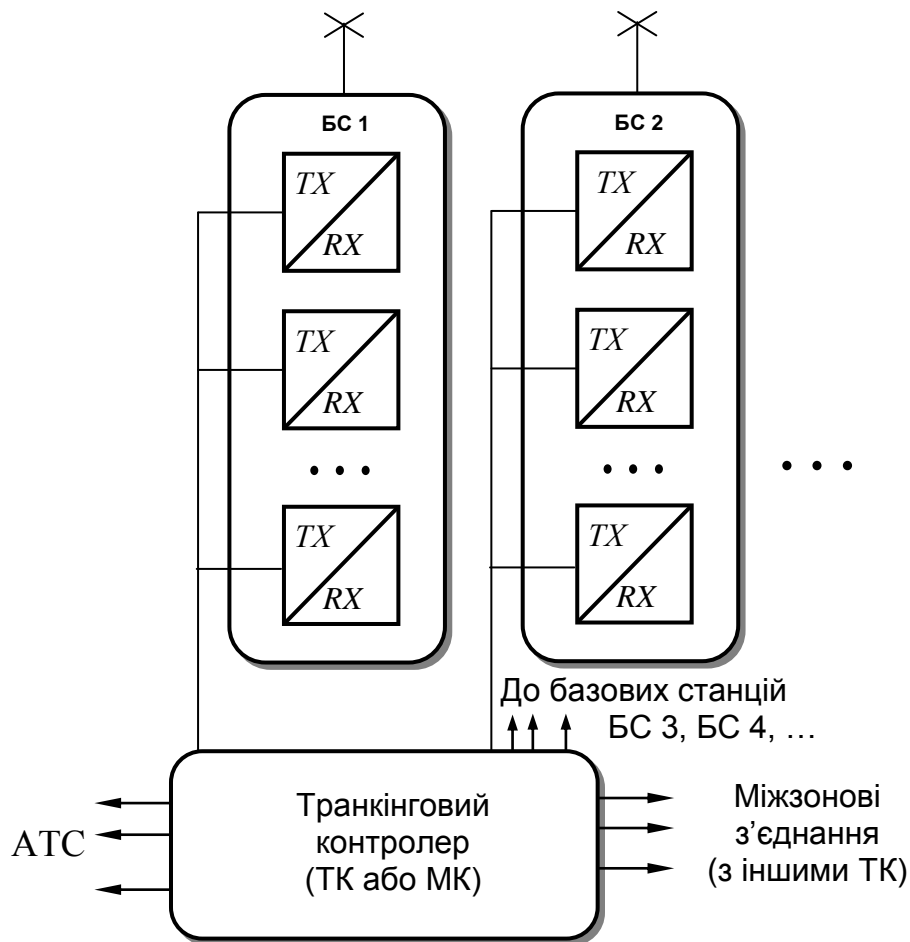


Рис. 7.5. Організація керування в транкінгових системах ACCESSNET

У найпростішому варіанті невеликий контролер *MMX* управляє однією базовою станцією, як, наприклад, у дешевих транкінгових системах *ACCESSNET-Contact* (контролер *MMX-4plus*) або *ACCESSNET-Mini*, контролер якої *MMX-8* схематично зображений на рис. 7.6. Вісім слотів під інтерфейсні блоки *LIA* і *PIA* розташовані в нижньому ряді праворуч від блоку процесора *KRA*.

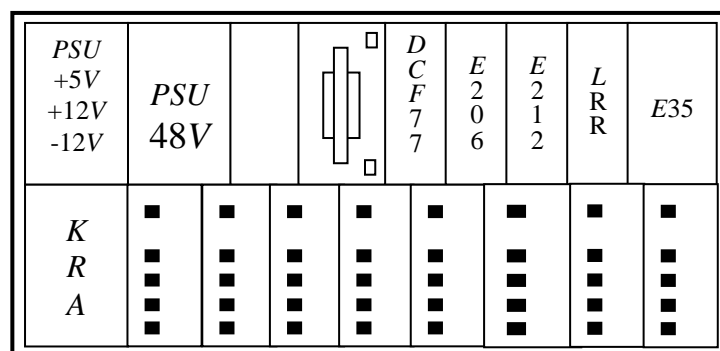


Рис. 7.6. Транкінговий контролер MMX-8

Контролери *MMX* можна поєднувати в мережі будь-якої конфігурації, починаючи від “зірки” і закінчуючи мережами найскладнішої топології з довільними з'єднаннями периферійних вузлів. У транкінгових мережах один з контролерів завжди виконує функції головного системного контролера (або майстер-контролера, МК), а інші будуть мати статус периферійних транкінгових контролерів (ТК).

Система керування мережею *ACCESSNET* має ієрархічну структуру. До складу багатозонової системи входить один центральний (головний) контролер *MSC (Master System Controller)* і декілька локальних (підлеглих) транкінгових контролерів *TSC (Trunking System Controller)*, що можуть бути зв'язані з центральним за допомогою цифрових або аналогових каналів. Прямі з'єднання між центральним і локальним контролерами не обов'язкові: необхідна прив'язка може бути реалізована за рахунок зв'язку локальних контролерів, а це істотно підвищує надійність системи.

Роль контролерів у системі *ACCESSNET* виконують комутатори *MMX (Mobile-Mobile Exchange)*. До складу кожного з них входять центральний процесор, контролери каналів і інтерфейсів, модулі комутації, джерела електроживлення і монтажний конструктив з електричним розведенням. Фірма *Rohde & Schwarz* випускає декілька модифікацій таких комутаторів: *MMX-4 plus*, *MMX-8*, *MMX-24* і *MMX-64*. Вони відрізняються числом посадкових місць для інтерфейсних плат, що забезпечують керування устаткуванням БС, міжзоновими з'єднаннями, підключенням до АТС і диспетчерських терміналів.

Для будівництва одно- або двозонової систем із невеликою кількістю каналів найбільш доцільно використовувати комутатори *MMX-4 plus* і *MMX-8*. Базові станції, що застосовують *MMX-4 plus* і *MMX-8*, можуть працювати як автономно, так і в складі багатозонової транкінгової системи. Таку БС можна установити на транспортному засобі або в мобільному контейнері і користуватися нею для радіо- і радіотелефонного зв'язку в надзвичайних ситуаціях, при проведенні великих масових заходів або при необхідності швидкого нарощування зони обслуговування існуючої системи транкінгового зв'язку.

Для створення транкінгової мережі середніх розмірів, а також при необхідності використовувати базові станції з числом каналів від 8 до 12 варто орієнтуватися на більш потужний комутатор - *MMX-24*. Його модифікація *MMX-24E* забезпечує монтаж 32 інтерфейсних плат.

У великих системах транкінгового зв'язку, як правило, застосовується комутатор *MMX-64*, обладнаний цифровими модулями комутації (число портів для інтерфейсних карт - до 96). Системи *ACCESSNET* можуть об'єднуватися в єдину мережу. У цьому випадку до центрального контролера *MSC* через *RS-232* підключається комп'ютер керування на платформі *Unix*, який має назву *OMC (Operating and Maintenance Computer)*. Він оснащений спеціалізованим програмним забезпеченням і служить інтерфейсом між транкінговою системою та

оператором. Мережевий варіант *ОМС* передбачає можливість організації локальної мережі з 8 робочих станцій і серверу *ОМС*, що буде забезпечувати керування транкінговою системою і збереження інформації про абонентів. База даних *ОМС* містить дані про трафік та аварійні повідомлення системи.

Комп'ютер керування може поставлятися в двох модифікаціях: *NeOS (Network Operating System)* - для невеликих систем і *ОМС* - для середніх і великих систем.

Опрацювання інформації про виклики здійснюється за допомогою системи тарифікації "*MARS*". Модуль *MOMo-Maint (Maintenance and Operating Module)* дозволяє наочно відображати наявну структуру системи зв'язку і динаміку процесів, керувати основними функціями, використовуючи графічний інтерфейс *MOMo-Maint*, а також друкувати звіт про аварійні ситуації.

Важливою функціональною особливістю системи *ACCESSNET* є наявність у стандартному постачанні диспетчерської консолі *CON-912*, що являє собою настільний блок, у якому сполучені телефон і мобільний термінал. Диспетчерська консоль підключається безпосередньо до *ММХ* по чотирьохпроводовій лінії. Щоб створити в системі додаткові диспетчерські термінали, що підключаються до системи зв'язку не по проводам, а по радіоканалу, існує спеціалізована диспетчерська консоль *REM-227*, що використовує для зв'язку із системою через ефір стаціонарну радіостанцію *GM1200*. Кількість диспетчерських терміналів у системі не обмежена.

Організація локальних техніко-експлуатаційних служб забезпечується за рахунок застосування терміналів *ОМТ*, місця установки яких не регламентуються.

7.5. Транкінгова система протоколу *LTR*

Системи протоколу *LTR*(фірма *E.F. Johnson*, США) відносяться до класу систем із незакріпленим каналом керування або із розподіленим керуванням.

Перша перевага розподіленого методу керування полягає в тому, що доступ до системи може бути виконаний по кожному з вільних каналів. Кожний ретранслятор визначає, який із каналів вільний, і передає цю інформацію в потоці даних одночасно з мовним повідомленням. Це означає, що кожний ретранслятор підтримує власний потік даних і обслуговує всі звернення до своїх каналів. Конфліктним ситуаціям запобігають самі абоненти. Це цілком забезпечує паралельне опрацювання усіх викликів.

Друга перевага розподіленого керування полягає у використанні всіх каналів для мовного зв'язку. У системах із виділеним каналом керування цей канал звичайно не може використовуватися для мовного зв'язку.

У системі *LTR* для місцевих викликів (від однієї портативної станції до іншої) утримання каналу на увесь час сеансу зв'язку не використовується. Канал утримується тільки на час передачі, тобто час між передачами може використовуватися іншими абонентами, що здійснюють свої виклики. Утримання робочого каналу в транкінговій системі *LTR* має місце тільки у випадку телефонних викликів.

Пріоритети доступу дозволяють визначати, хто має право на першочерговий доступ до зайнятої системи. У більшості систем із виділеним каналом керування використовується метод, що дозволяє всім абонентам намагатися одержати доступ до системи, але при цьому система відмовляє в доступі абонентам із низьким рівнем пріоритету, не надаючи їм канал, і ставить їх у чергу на обслуговування.

У системах із розподіленим керуванням жодний з абонентів не може навіть намагатися здійснити доступ доти, поки не з'явиться хоча б один вільний канал. Абонентом, що після цього одержить доступ, буде той, хто першим зробить спробу. Цей метод доступу так і називається: "першим прийшов - першим обслуговується". У всіх абонентів однакові рівні пріоритети.

Керування системою засноване на обміні службовими повідомленнями між абонентською станцією і ретранслятором. Обмін даними здійснюється постійно на субтональній частоті 150 Гц одночасно з передачею мовних повідомлень. При цьому відпадає необхідність у виділеному каналі керування, і тому для забезпечення максимальної ефективності системи всі канали можуть бути використані для передачі мовних повідомлень. Якщо один ретранслятор вийде з ладу, інші ретранслятори залишаються працездатними.

Службові повідомлення несуть інформацію абонентам про те, який із ретрансляторів вільний. Абонентські прийомопередавачі можуть передавати і приймати тільки задані оператором системи ідентифікаційні коди. Отже, інші абоненти не можуть втрутитися в не стосовний до них сеанс зв'язку.

Логічні блоки всіх ретрансляторів у межах однієї станції з'єднуються між собою високошвидкісною (18,750 біт/с) послідовною шиною даних. По цій шині ретранслятори передають один одному інформацію про свій стан та ідентифікаційні коди абонентських прийомопередавачів, що займають даний канал.

7.6. Особливості цифрових транкінгових систем

Цифрові системи у порівнянні з аналоговими забезпечують ряд переваг за рахунок реалізації вимог по підвищеній оперативності і безпеці зв'язку, наданню широких можливостей по передачі даних, більш широкому спектру послуг зв'язку (включаючи специфічні послуги зв'язку для реалізації спеціальних вимог служб суспільної безпеки), можливостям організації взаємодії абонентів різних мереж.

1. *Висока оперативність зв'язку.* Насамперед, ця вимога означає мінімально можливий час встановлення каналу зв'язку (час доступу) при різних видах з'єднань (індивідуальних, групових, з абонентами телефонних мереж та ін.). У конвенціональних системах зв'язку при передачі цифрової інформації, що вимагає часової синхронізації передавача і приймача, для встановлення каналу зв'язку потрібно більше часу, ніж аналоговій системі. Однак, для транкінгових систем радіозв'язку, де інформаційний обмін, в основному, здійснюється через базові станції, цифровий режим порівняний за часом доступу з аналоговим (і в аналогових, і в цифрових системах радіозв'язку, як правило, канал керування реалізується на основі цифрових сигналів).

Крім цього, у системах цифрового транкінгового радіозв'язку простіше реалізуються різні режими зв'язку, що підвищують їх оперативність, такі, як режим безпосереднього (прямого) зв'язку між мобільними абонентами (без використання базової станції), режим відкритого каналу (виділення і закріплення частотних ресурсів мережі за визначеною групою абонентів для ведення ними надалі переговорів без виконання складних процедур, у т.ч. без затримки), режими аварійних і пріоритетних викликів та ін.

2. *Передача даних.* Цифрові системи транкінгового радіозв'язку краще пристосовані до різних режимів передачі даних, що надає абонентам цифрових мереж широкі можливості оперативного одержання відомостей з централізованих баз даних, передачі необхідної інформації, включаючи зображення, організації централізованих диспетчерських систем місцезорозташування мобільних об'єктів на основі супутникових радіонавігаційних систем. Швидкість передачі даних у цифрових системах значно вища, ніж в аналогових.

У більшості систем радіозв'язку на основі цифрових стандартів реалізуються послуги передачі коротких і статусних повідомлень, персонального радіовиклику, факсимільного зв'язку, доступу до фіксованих мереж зв'язку (у т.ч. працюючим на основі протоколів *TCP/IP*).

3. *Безпека зв'язку.* Містить у собі вимоги по забезпеченню таємності переговорів (виключення можливості витягу інформації з каналів зв'язку кому-небудь, крім санкціонованого одержувача) і захисту від несанкціонованого доступу до системи (виключення можливості захоплення керування системою і спроб вивести її з ладу, захист від «двійників» і т.п.). Як правило, основними механізмами забезпечення безпеки зв'язку є шифрування й автентифікація абонентів.

Природно, що в системах цифрового радіозв'язку набагато легше організувати безпеку зв'язку у порівнянні з аналоговими. Навіть без вживання спеціальних заходів по закриттю інформації цифрові системи забезпечують підвищений рівень захисту переговорів (аналогові скануючі приймачі непридатні для прослуховування переговорів у системах цифрового радіозв'язку). Крім того, деякі стандарти цифрового

радіозв'язку передбачають можливість наскрізного шифрування інформації, що дозволяє використовувати оригінальні (тобто, розроблені самим користувачем) алгоритми закриття мови.

Цифрові системи транкінгового радіозв'язку дозволяють використовувати різноманітні механізми автентифікації абонентів: різні ідентифікаційні ключі і *SIM*-карти, складні алгоритми автентифікації, що використовують шифрування і т.п.

4. *Послуги зв'язку*. Цифрові транкінгові системи реалізують сучасний рівень сервісного обслуговування абонентів мереж зв'язку, надаючи можливості автоматичної реєстрації абонентів, роумінгу, керування потоком даних, різних режимів пріоритетного виклику, переадресації виклику і т.д.

Поряд зі стандартними функціями мережевого обслуговування, за заявками правоохоронних органів, у стандарти цифрового транкінгового радіозв'язку часто включають вимоги по наявності специфічних послуг зв'язку: режиму виклику, що надходить тільки із санкції диспетчера системи; режиму динамічної модифікації груп користувачів; режиму дистанційного включення радіостанцій для акустичного прослуховування обстановки і т.д.

5. *Можливість взаємодії*. Цифрові системи радіозв'язку, що мають гнучку структуру адресації абонентів, надають широкі можливості як для створення різних віртуальних мереж у рамках однієї системи, так і для організації при необхідності взаємодії абонентів різних мереж зв'язку. Для служб безпеки особливо актуальним є вимога по забезпеченню можливості взаємодії підрозділів різних відомств для координації спільних дій при надзвичайних ситуаціях.

До найбільш популярних, що мають міжнародне визнання, стандартів цифрового транкінгового радіозв'язку, на основі яких у багатьох країнах розгорнуті системи зв'язку, відносяться:

- **EDACS**, розроблений фірмою *Ericsson*;
- **TETRA**, розроблений Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів;
- **APCO 25**, розроблений Асоціацією офіційних представників служб зв'язку органів суспільної безпеки;
- **Tetrapol**, розроблений фірмою *Matra Communication* (Франція);
- **iDEN** розроблений фірмою *Motorola* (США).

Ці стандарти відповідають сучасним вимогам до систем транкінгового радіозв'язку. Вони дозволяють створювати різні конфігурації мереж зв'язку: від найпростіших локальних однозонових систем до складних багатозонових систем регіонального чи національного рівня. Системи на основі даних стандартів забезпечують різні режими передачі мови (індивідуальний зв'язок, груповий зв'язок, широкомовний виклик і т.п.) і даних (комутація пакетів, передача даних з комутацією ланцюгів, короткі повідомлення і т.п.) і можливість організації зв'язку з різними системами по стандартних інтерфейсах (з цифровою

мережею з інтеграцією послуг, телефонною мережею загального користування, відомчою АТС тощо). У системах радіозв'язку зазначених стандартів застосовуються сучасні способи мовоперетворення, поєднані з ефективними методами завадостійкого кодування інформації. Усі системи припускають можливість використання дуплексного радіозв'язку. Виробники радіозасобів забезпечують відповідність їх стандартам *MIL STD 810* по різних кліматичних і механічних впливах.

Порівняння основних технічних характеристик наведено в таблиці 7.1, а функціональних можливостей – в таблицях 7.2 і 7.3.

На основі зазначених зведень можна провести порівняльний аналіз представлених стандартів цифрового і аналогового транкінгового радіозв'язку. Однак варто розуміти, що сформулювати чіткі критерії вибору стандарту радіозв'язку практично неможливо. Як показує практика, у більшості випадків вибір варіанта побудови тієї чи іншої системи зв'язку (особливо систем зв'язку державних органів) визначається не тільки технічними показниками системи зв'язку, але й іншими факторами, серед яких перше місце займають вартість реалізації та економічна ефективність проекту. Крім того, значну роль у виборі відіграють політичні погляди, наявність традиційних контактів з постачальниками засобів радіозв'язку та інші фактори. Тому певний інтерес являє проведення порівняльного аналізу зазначених стандартів цифрового транкінгового радіозв'язку на основі деяких факторів, що включають не тільки технічні аспекти побудови системи зв'язку.

Основні технічні характеристики транкінгових систем зв'язку

Таблиця 7.1

№	Характеристика стандарту зв'язку	<i>MPT 1327</i>	<i>TETRA</i>	<i>EDACS</i>	<i>APCO 25</i>	<i>Tetrapol</i>
1.	Статус стандарту	відкритий	відкритий	корпоративний	відкритий	корпоративний
2.	Основні виробники радіозасобів	<i>Motorola, Nokia, Ericsson, Bosch, Philips</i>	<i>Nokia, Alcatel, Motorola, OTE</i>	<i>Ericsson</i>	<i>Motorola, E.F.Johnson Inc., Transcript, ADI Limited</i>	<i>Matra, Nortel, CS Telecom</i>
3.	Можливий діапазон робочих частот, МГц	146-174; 300-344; 400-512	теоретично 150-900; виділено в Європі для служб суспільної безпеки 380-395/390-395	138-174; 403-423; 450-470; 806-870	138-174; 406-512; 746-869	70-520
4.	Рознесення між частотними каналами, кГц	12,5	25	25; 12,5 (передача даних)	12,5; 6,25	12,5; 10
5.	Ефективна смуга частот на один мовний канал, кГц	12,5	6,25	25	12,5; 6,25	12,5; 10
6.	Вид модуляції	<i>FM</i>	π/4-DQPSK	<i>FM</i>	<i>C4FM</i> (12,5 кГц) <i>CQPSK</i> (6,25 кГц)	<i>GMSK</i> (BT-0,25)
7.	Метод мовного кодування (швидкість мовоперетворення)	немає	<i>CELP</i> (4,8 кбіт/с)	адаптивне багаторівневе кодування (мовоперетворення 64 кбіт/с і компресія до 9,2 кбіт/с)	<i>IMBE</i> (4,4 кбіт/с)	<i>RPCELP</i> (6 кбіт/с)
8.	Швидкість передачі даних в каналі, біт/с	-	7200 (28800-при передачі 4-х інформаційних каналів на одній фізичній частоті)	9600	9600	8000
9.	Час встановлення каналу зв'язку, с	0,7	0,2 с - при індив. виклику (min); 0,17 с - при груповому виклику (min).	0,25 (в однозоновій системі)	0,25 - у режимі прямого зв'язку; 0,35 - у режимі ретрансляції; 0,5 - у радіопідсистемі	не більше 0,5
10.	Метод поділу каналів зв'язку	<i>FDMA</i>	<i>TDMA</i>	<i>FDMA</i>	<i>FDMA</i>	<i>FDMA</i>
11.	Вид каналу керування	виділений	виділений або розподілений (в залежності від конфігурації мережі)	виділений	виділений	виділений
12.	Можливості шифрування інформації	немає	1)стандартні алгоритми; 2)наскрізне шифрування	стандартний фірмовий алгоритм наскрізного шифрування	4 рівні захисту інформації	1) стандартні алгоритми; 2)наскрізне шифрування

Таблиця 7.2

№ з/п	Функціональні можливості системи зв'язку	EDACS	TETRA	APCO 25	MPT 1327
1.	Підтримка основних видів виклику (індивід., груповий, широкомовн.)	+	+	+	+
2.	Вихід на ТфЗК	+	+	+	+
3.	Передача даних і доступ до централізованих баз даних	+	+	+	-
4.	Режим прямого зв'язку	+	+	+	-
5.	Автоматична реєстрація мобільних абонентів	+	+	+	-
6.	Персональний виклик	-	+	+	+
7.	Доступ до фіксованих мереж IP	+	+	+	+
8.	Передача статусних повідомлень	+	+	+	+
9.	Передача коротких повідомлень	-	+	+	+
10.	Підтримка режиму передачі даних про місцезнаходження (від системи GPS)	+	+	н/в	-
11.	Факсимільний зв'язок	-	+	+	-
12.	Множинний доступ з використанням списку абонентів	-	+	+	+

Таблиця 7.3

№	Спеціальні послуги зв'язку	EDACS	TETRA	APCO 25	MPT 1327
1.	Пріоритет доступу	+	+	+	+
2.	Система пріоритетних викликів	+	+	+	+
3.	Динамічне перегрупування	+	+	+	+
4.	Вибіркове прослуховування	+	+	+	-
5.	Дистанційне прослуховування	-	+	н/в	-
6.	Ідентифікація станції, що викликає	+	+	+	-
7.	Виклик, санкціонований диспетчером	+	+	+	+
8.	Дистанційне відключення абонента	н/в	+	+	+
9.	Автентифікація абонентів	н/в	+	+	-

примітка: (н/в - немає відомостей).

Технічні характеристики і функціональні можливості

Розглядаючи технічні характеристики і функціональні можливості представлених стандартів транкінгового зв'язку, можна відзначити, що всі стандарти мають високі (щодо даного класу систем мобільного радіозв'язку) технічні показники. Вони дозволяють будувати різні конфігурації мереж зв'язку, забезпечують різноманітні режими передачі мови і даних, зв'язок із абонентами ТфЗК, використання у своїх системах дуплексних радіостанцій. В засобах радіозв'язку даних стандартів використовуються ефективні методи мовоперетворення і завадостійкого кодування інформації, окрім стандарту *MPT 1327*. Всі стандарти підтримують високу оперативність зв'язку.

Можна відзначити, що у порівнянні з іншими стандартами, *MPT 1327* та *EDACS* мають трохи меншу спектральну ефективність. Крім того, в стандартах *EDACS* та *MPT 1327* не використовуються цифрові методи модуляції, що дозволяє говорити про них як про стандарти, у яких здійснюється передача цифрованої мовної інформації по аналоговому каналу зв'язку.

За функціональними можливостями стандарти *MPT 1327* та *EDACS* мабуть також у значній мірі поступаються іншим трьом стандартам, тому що вони були розроблені набагато раніше. Стандарти *TETRA*, *APCO 25* і *Tetrapol* надають широкий спектр наданих стандартних, приблизно однакових, послуг зв'язку.

Ресурси радіочастотного спектру

Наявність ресурсів радіочастотного спектру для розгортання системи радіозв'язку є найважливішим критерієм вибору тієї чи іншої системи. У даному випадку найбільш перспективні стандарти, що забезпечують можливість побудови мереж зв'язку у найбільш широкому діапазоні.

Системи *EDACS* реалізуються в діапазонах 138-174, 403-423, 450-470 і 806-870 МГц.

Системи *TETRA* теоретично забезпечують можливість роботи в дуже широкому діапазоні (150...900 МГц). Разом з тим, поки що виробники пропонують в основному устаткування, що функціонує тільки в діапазоні, виділеному в Європі для побудови мереж *TETRA* - 380-385/390-395 та 410-430/450-470 МГц.

Системи *APCO 25*, відповідно до функціональних і технічних вимог, забезпечують можливість роботи у всіх діапазонах, відведених для рухомого радіозв'язку.

Стандарт *Tetrapol* обмежує верхню частоту своїх систем на рівні 520 МГц.

Виконання спеціальних вимог до систем радіозв'язку служб суспільної безпеки

Так як, принаймні, перші чотири з п'яти розглянутих стандартів розроблялися з урахуванням інтересів служб суспільної безпеки, всі вони забезпечують виконання більшості вимог, запропонованих до

спеціальних систем зв'язку, що можна спостерігати на таблиці 7.3. Представлені цифрові стандарти забезпечують високу оперативність зв'язку (час доступу для всіх систем - не більше 0,5 с) і передбачають можливості підвищення надійності мереж радіозв'язку за рахунок гнучкої архітектури. Стандарти дозволяють реалізувати захист інформації. Вони передбачають можливість використання як стандартного алгоритму шифрування, так і оригінальних алгоритмів за рахунок наскрізного шифрування.

Статус стандарту

При виборі стандарту радіозв'язку обов'язково необхідно враховувати інформацію про те, яким є стандарт: відкритим або корпоративним (закритим).

Корпоративні стандарти (*EDACS* і *Tetrapol*) є власністю їхніх розробників. Придбання устаткування можливе тільки в обмеженого кола виробників.

Відкриті стандарти, до яких відносяться *MPT 1327*, *TETRA* і *APCO 25*, забезпечують створення конкурентного середовища, залучення великої кількості виробників базового устаткування, абонентських радіостанцій, тестової апаратури для випуску сумісних радіозасобів, що сприяє зниженню їхньої вартості. Доступ до специфікацій стандартів надається будь-яким організаціям і фірмам, що вступили у відповідну асоціацію. Користувачі, що вибирають відкритий стандарт радіозв'язку, не попадають у залежність від єдиного виробника і можуть змінювати постачальників устаткування. Відкриті стандарти користаються підтримкою з боку державних і правоохоронних структур, великих компаній багатьох країн світу, а також підтримуються ведучими світовими виробниками елементної і вузлової бази.

7.7. Транкінгова система стандарту *TETRA*

Стандарт *TETRA* включає дві специфікації:

- *TETRA Voice + Data (TETRA V+D)*;
- *TETRA Packet Data Optimized (TETRA PDO)*.

Відповідно до назви, ***TETRA V+D*** - це стандарт на інтегровану систему передачі мови і даних, а ***TETRA PDO*** - стандарт, орієнтований тільки на передачу даних.



Радіоінтерфейс стандарту *TETRA* припускає роботу в діапазоні частот УКХ із кроком 25 кГц. В одному частотному каналі за технологією *TDMA* може бути організовано 4 фізичних канали. Для систем стандарту *TETRA* можуть використовуватися діапазони від 150 МГц до 900 МГц, проте реально в країнах Європи виділяються для комерційних установ смуги частот (410...430)/(450...470) МГц та (870...876)/(915...921) МГц, для служб безпеки – (380...385)/(390...395) МГц. Мінімальне дуплексне рознесення для систем стандарту *TETRA* складає 10 МГц. В радіоканалі використовується відносна фазова модуляція типу $\pi/4$ -*DQPSK* з

постійною огибаючою. Таким чином, кожному символу модуляції відповідає передача двох біт інформації. Для перетворення мови в стандарті *TETRA V+D* використовується кодек з алгоритмом *CELP*. Швидкість цифрового мовного потоку на виході кодека складає 4,8 кбіт/с. До надходження на вхід модулятора, до мовного потоку додається корегуючий код, після чого проводиться міжблочне перемежування.

Потужність базових станцій становить 0,6...40 Вт, мобільних – 1...30 Вт, носимих – 1...3 Вт.

Архітектура мережі

Специфікація стандарту *TETRA* не накладає обмежень на архітектуру мережі зв'язку. Завдяки модульному принципу побудови можуть бути реалізовані різноманітні конфігурації мережі з різною географічною протяжністю.

Функціональні схеми побудови різних систем стандарту *TETRA* представляються як сукупність елементів мережі, з'єднаних визначеними специфікованими інтерфейсами. Мережі стандарту *TETRA* містять наступні основні елементи:

- базова приймально-передавальна станція (БС) (*BTS*) - забезпечує зв'язок у визначеній зоні. БС виконує основні функції, пов'язані з передачею радіосигналів: з'єднання із МС, шифрування каналу зв'язку, просторово-рознесення прийом, керування вихідною потужністю мобільних станцій, керування радіоканалами;

- пристрій керування БС (*BCF*) - елемент мережі з можливостями комутації, що керує декількома БС і забезпечує доступ до зовнішніх мереж *ISDN*, *PSTN*, *PDN*, *PABX*, а також використовується для підключення ДП і терміналів *TOE*;

- контролер БС (*BSC*) - елемент мережі з великими у порівнянні з пристроєм *BCF* комутаційними можливостями, що дозволяє обмінюватися даними між декількома *BCF*. Так само, як і *BCF* забезпечує доступ до зовнішніх мереж, *BSC* має гнучку модульну структуру, що дозволяє використовувати велику кількість інтерфейсів різного типу. У мережах *TETRA* контролери БС можуть виконувати функції з'єднання з іншими мережами *TETRA* і керування централізованими базами даних (БД);

- диспетчерський пульт (ДП) - пристрій, що підключається до контролера БС по провідній лінії й забезпечує обмін інформацією між оператором (диспетчером мережі) і іншими користувачами мережі;

- мобільна станція (*MS*);

- стаціонарна радіостанція (*FRS - Fixed Radio Station*) - РС, що використовується абонентом у визначеному місці;

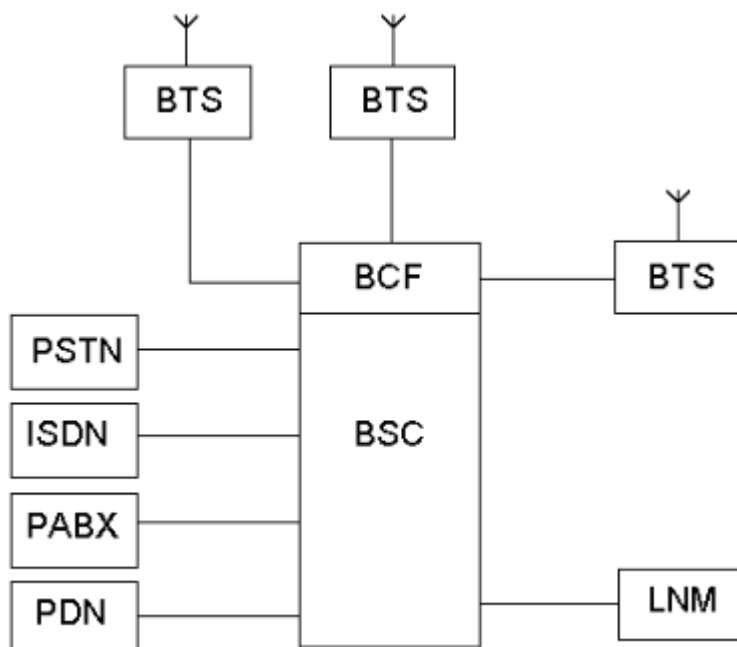
- термінал технічного обслуговування та експлуатації (*TOE*) - термінал, що підключається до пристрою керування базовою станцією *BCF* і призначений для контролю за станом системи, проведення діагностики несправностей, обліку тарифікаційної інформації і т.п. За

допомогою таких терміналів реалізується функція керування локальною мережею (*LNМ - Local Network Management*).

Завдяки модульному принципу побудови, системи стандарту *TETRA* можуть бути реалізовані з різними ієрархічними рівнями і різною географічною довжиною (від локальних до національних). Функції керування базами даних і комутації розподіляються по всій мережі, що забезпечує швидку передачу викликів і збереження обмеженої працездатності мережі навіть при втраті зв'язку з її окремими елементами.

На національному чи регіональному рівні структура мережі може бути реалізована на основі порівняно невеликих підмереж *TETRA*, з'єднаних одна з одною за допомогою міжсистемного інтерфейсу *ISI* для створення загальної мережі. Під терміном «підмережа» звичайно розуміють автономну мережу. При цьому можливе централізоване керування мережею.

Варіанти побудови мережі показано на рис. 7.7.



**Рис. 7.7.а Конфігурація мережі *TETRA*
з одним модулем *BSF***

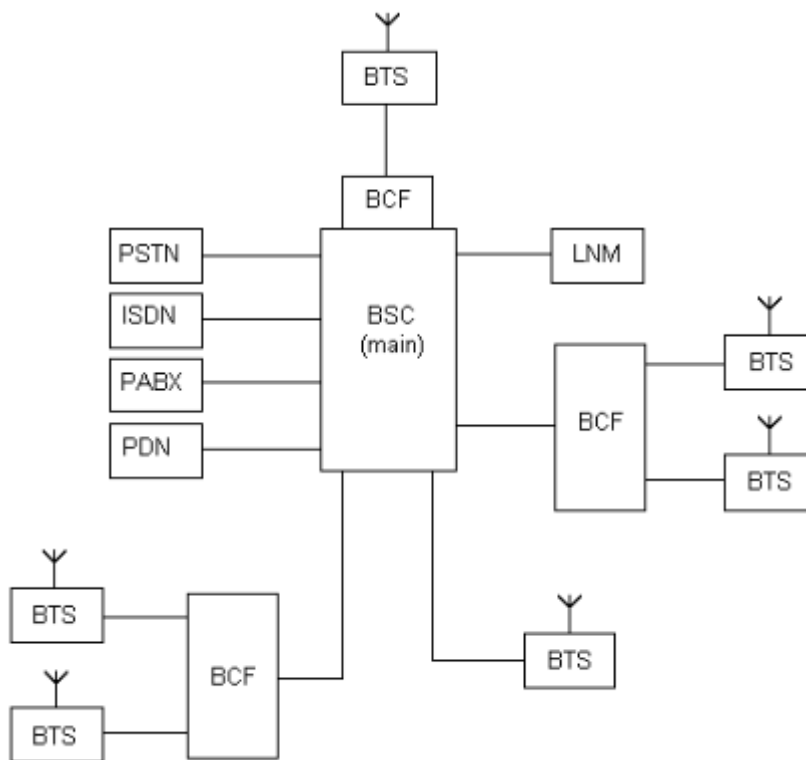


Рис.7.7.б. Структура мережі *TETRA*, яка побудована по конфігурації «зірка»

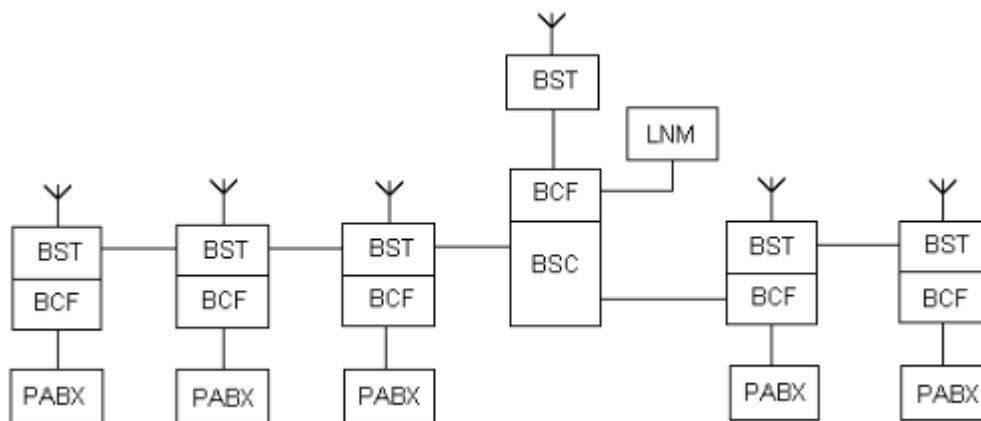


Рис.7.7.в. Структура мережі *TETRA*, яка побудована по лінійній конфігурації

Режими передачі мовної інформації

У системах стандарту *TETRA* інформаційний обмін забезпечується за допомогою так званих телесервісних служб. Підтримуються 2 основні види інформаційного обміну: передача мови і передача даних. При цьому мова і дані можуть передаватися одночасно з одного терміналу по різних логічних каналах.

Для передачі мови використовуються служби мовного зв'язку, що забезпечують наступні режими:

- мовний зв'язок з індивідуальним викликом абонентів,

- багатобічний мовний зв'язок, що припускає груповий виклик абонентів;

- широкомовна передача мови.

Усі режими мовного зв'язку передбачають можливість передачі як відкритої мовної інформації, так і мови, захищеної за допомогою визначених алгоритмів шифрування.

Індивідуальний виклик припускає встановлення комутованого двоточкового з'єднання між двома мобільними абонентами чи між мобільним абонентом і стаціонарним терміналом для забезпечення прямого двостороннього зв'язку.

Індивідуальний виклик і наступний обмін мовною інформацією може здійснюватись або в дуплексному режимі, або в режимі двочастотного симплексу.

Індивідуальний виклик може бути ініційований будь-яким користувачем системи *TETRA* і спрямований будь-якому абоненту, зареєстрованому в даній системі з визначеною адресою, включаючи абонентів ТфЗК, зовнішніх УАТС і т.п. З'єднання, встановлене за допомогою індивідуального виклику, може бути перерване як викликаючим, так і викликуваним абонентом.

Груповий виклик припускає встановлення комутованого багатоточкового двонаправленого з'єднання між викликаючою стороною і декількома викликуваними абонентами.

Обмін мовною інформацією після групового виклику відбувається тільки в режимі двочастотного симплексу. При цьому обмін повідомленнями між членами групи здійснюється в режимі «кожний чує кожного».

Груповий виклик може бути ініційований або мобільним абонентом, або диспетчером мережі за допомогою лінійного терміналу. Ініціатор (контролер) групового виклику відповідає за всі аспекти з'єднання (нарахування оплати, можливості використання допоміжних служб і т.д.). У визначених ситуаціях викликаючий абонент може передавати свої повноваження по встановленню групового з'єднання іншому члену групи за допомогою допоміжної служби «передачі керування». При цьому передбачається, що новий контролер має повноваження, аналогічні повноваженням ініціатора з'єднання.

Для встановлення групового з'єднання використовується так званий груповий номер, що привласнюється кожному із членів групи. Груповий номер мобільному абоненту може бути привласнений оператором мережі двома способами:

— статично при конфігурації системи;

— динамічно по радіоінтерфейсу при модифікації груп абонентів.

Груповий виклик може бути переданий усіма базовими станціями, у зонах дії яких зареєстровані мобільні абоненти даної групи. Існують дві модифікації групового виклику:

— стандартний груповий виклик;

— груповий виклик з підтвердженням.

Стандартний груповий виклик призначений для швидкого встановлення з'єднання. Переривання з'єднання може здійснюватись тільки ініціатором групового з'єднання.

Груповий виклик з підтвердженням вимагає більшого часу на організацію групового з'єднання, однак він забезпечує перевірку присутності всіх абонентів групи.

При груповому виклику з підтвердженням забезпечується наступний порядок роботи. Викликаючий абонент посилає в мережу груповий виклик з підтвердженням, після чого інфраструктура здійснює виклик членів групи. У випадку, якщо інфраструктура не має списку членів групи, про це повідомляється ініціатору повідомлення.

Кожен член групи, що одержав сигнал виклику, посилає в інфраструктуру сигнал підтвердження і переходить у режим мовного зв'язку у виділеному каналі. Повідомлення про відсутність абонентів або їхньої зайнятості передаються на термінал ініціатора повідомлення. Викликаючий абонент може почати передачу повідомлень по закінченню встановлення з'єднання чи перервати з'єднання, якщо прийме рішення про недостатність складу абонентів, що установили групове з'єднання.

Стандарт *TETRA* при використанні однієї із своїх допоміжних служб передбачає можливість пізнішого підключення до групи абонента, який був зайнятий у момент встановлення з'єднання.

Вихід із групового з'єднання при виклику з підтвердженням може бути здійснений будь-яким абонентом.

Широкомовний виклик призначений для організації односторонньої передачі мовної інформації від викликаючої сторони декільком викликуваним абонентам.

Широкомовний виклик і наступна передача мовної інформації здійснюється в симплексному режимі. Він може бути ініційований або симплексним абонентом, або диспетчером мережі за допомогою лінійного терміналу.

Відповідачі широкомовного повідомлення, тобто викликувані абоненти, називаються широкомовною групою. Така група може включати як мобільних абонентів, так і лінійні термінали. Члени групи мають один загальний широкомовний номер, що може збігатися з груповим номером. Якщо рухливі абоненти зареєстровані в зонах дії декількох базових станцій, виклик може бути посланий на всі базові станції. При цьому диспетчер мережі може вибрати режим стандартного широкомовного виклику чи широкомовного виклику з підтвердженням.

Широкомовне з'єднання може бути перерване тільки ініціатором виклику.

Принцип кодування (декодування) мови в стандарті TETRA

Спілкування абонентів *PMR*-систем часто проходить в умовах високого рівня навколишнього шуму. На відміну від користувачів

стільникового зв'язку, що звичайно можуть обирати придатне місце для ведення переговорів, абоненти *PMR*-систем з різних служб безпеки не мають у своєму розпорядженні такої можливості: їм нерідко доводиться працювати на фоні завивання сирен, пострілів, переговорів в режимі гучного зв'язку тощо. Ця особливість була врахована при створенні устаткування *TETRA*. Воно забезпечує необхідну в такій обстановці велику потужність вихідного аудіосигнала, його мале спотворення і чіткість мови. Гарна якість переданої мови обумовлена використанням кодека *TETRA*.

В стандарті *TETRA* використовується алгоритм кодування мови, який базується на методі лінійного прогнозування з багатоімпульсним кодовим збудженням (*CELP* - *Code-Excited Linear Predictive*), що доповнений спеціальними кодовими книжками алгебраїчної структури. Цей механізм кодування одержав назву *Algebraic CELP (ACELP)*.

Для досягнення необхідної чистоти мови при передачі сигналу по радіоканалу зі швидкістю 7,2 кбіт/с (рис. 7.8) використовуються також методи прямої корекції помилок (**FEC** - *Forward Error Correction*) і циклічного надлишкового кодування (**CRC** - *Cyclic Redundancy Code*). В приймачі декодер робить аналогічні дії, але в зворотному порядку.

Засоби захисту радіоінтерфейсу стандарту *TETRA* включають механізми автентифікації абонента та інфраструктури, забезпечення конфіденційності трафіка за рахунок потоку псевдоімен і специфікованого шифрування інформації. Визначений додатковий захист інформації забезпечується можливістю переключення інформаційних каналів і каналів керування в процесі ведення сеансу зв'язку.

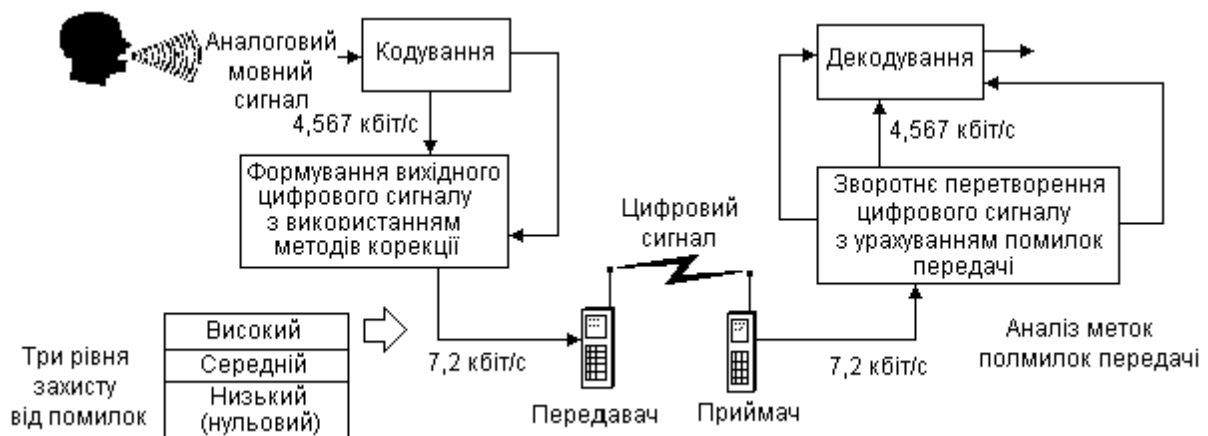


Рис. 7.8. Структура перетворення сигналу

Засоби безпеки

Більш високий рівень захисту інформації є унікальною вимогою спеціальних груп користувачів. Наскрізне шифрування забезпечує захист мови і даних у будь-якій точці лінії зв'язку між стаціонарними і

мобільними абонентами. Стандарт *TETRA* задає тільки інтерфейс для наскрізного шифрування, забезпечуючи тим самим можливість використання оригінальних алгоритмів захисту інформації.

Основними механізмами забезпечення безпеки інформації в стандарті *TETRA* є:

- автентифікація абонентів;
- шифрування інформації;
- забезпечення таємності абонентів.

Під автентифікацією абонента звичайно розуміють механізм підтвердження його дійсності. Процедури автентифікації (рис. 7.9) використовуються для виключення несанкціонованого використання ресурсів системи зв'язку.

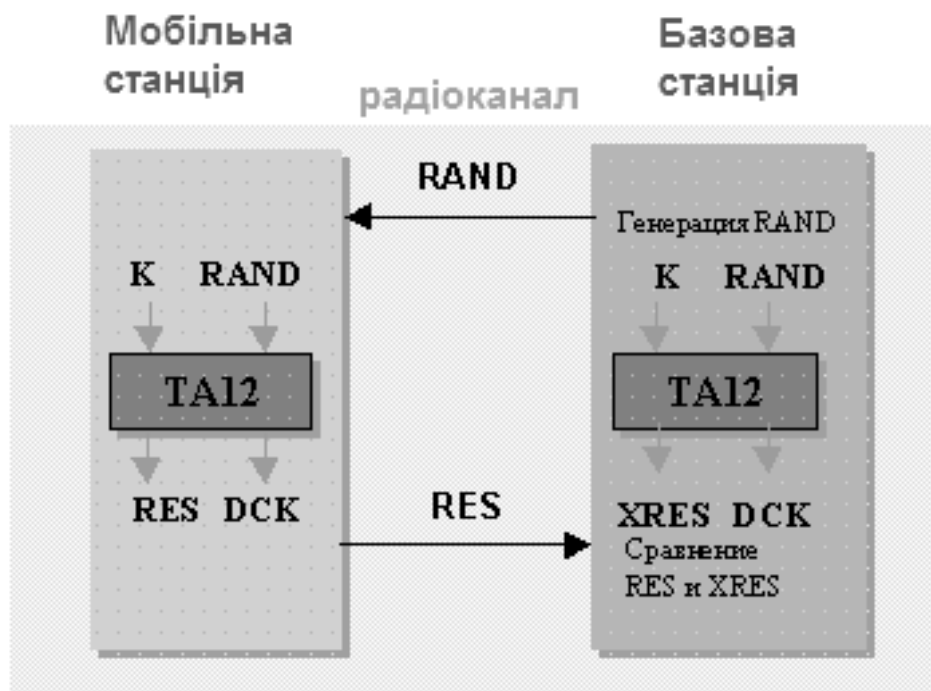


Рис. 7.9. Процедура автентифікації

У стандарті *TETRA* застосовується відносно нова концепція автентифікації, що використовує шифрування. Загальний принцип реалізації автентифікації полягає в тому, що мережа генерує та відправляє користувачу випадкову комбінацію *RAND*. Одержувач, використовуючи індивідуальний ключ автентифікації (*K*) та алгоритм *TA12*, розраховує *RES* і відправляє його в мережу, де він порівнюється з мережними даними. При їх співпадінні приймається рішення про успішну автентифікацію.

Для виконання процедури автентифікації кожен абонент на час користування системою зв'язку одержує стандартний електронний модуль дійсності абонента (*SIM*-карту), що містить запам'ятовуючий пристрій із записаним у ньому індивідуальним ключем автентифікації і контролер, що забезпечує виконання алгоритму автентифікації. За допомогою закладеної в *SIM*-карту інформації в результаті взаємного

обміну даними між мобільною і базовою станціями здійснюється повний цикл автентифікації і досягається доступ абонента до мережі.

Для забезпечення таємності переданої по радіоканалу інформації застосовується її шифрування. Усі конфіденційні повідомлення повинні передаватися в режимі із шифруванням інформації. Шифрування активізується тільки після успішного проведення процедури автентифікації.

Шифрування радіоінтерфейсу призначене для захисту мови і даних, а також даних сигналізації.

У стандарті *TETRA* використовується *потоківий метод шифрування*, при якому сформована ключова псевдовипадкова послідовність побітно додається до потоку даних, що передаються. Знаючи ключ і початкове значення псевдовипадкових послідовностей, одержувач інформації має можливість сформуванати таку ж послідовність і розшифрувати закодоване повідомлення при збереженні синхронізації між передавальною і приймальною сторонами.

Потокове шифрування має значну перевагу перед іншими методами шифрування, що полягає у відсутності розмноження помилок у каналі з завадами, тобто помилка прийому одного біта зашифрованого тексту дає також тільки один помилковий біт розшифрованого тексту і не приводить до декількох помилок.

Для шифрування радіоінтерфейсу можуть використовуватися наступні ключі шифрування.

1. Виділені ключі. Виділені ключі шифру (**DCK** - *Derived Cipher Key*) застосовуються для організації зв'язку типу "точка-точка" (використання виділених ключів можливе тільки після успішного завершення процедури автентифікації).

2. Статичні ключі (**SCK** - *Static Cipher Key*) - являють собою одну чи декілька (до 32) заданих величин, що завантажуються в базу даних мобільної станції, причому ці величини відомі мережі. (використовуються для обмеженого захисту сигналів сигналізації в системах, що функціонують без явної автентифікації).

3. Групові ключі (**ССК** - *Common Cipher Key*) - використовуються для шифрування інформації при широкомовному виклику, формуються в мережі і розподіляються мобільним абонентам по радіоканалах після процедури автентифікації.

Виділений ключ шифрування **DCK** розраховується з використанням алгоритму TA12 (див. рис.7.9).

Для виключення визначення (ідентифікації) абонентів шляхом перехоплення повідомлень, переданих по радіоканалу, у стандарті *TETRA* використовуються тимчасові ідентифікаційні номери абонентів.

Після першого контакту (сеансу зв'язку) мережі з користувачем унікальний ідентифікаційний номер абонента може бути замінений на тимчасовий (псевдонім). При кожній новій реєстрації користувача псевдонім може бути замінений на новий. Крім того, як індивідуальний,

так і груповий ідентифікаційний номер може бути захищений за допомогою шифрування радіоінтерфейсу.

Таємність абонента зберігається також при виконанні процедури коректування місця розташування абонента, тобто при переході абонента із зони в зону мобільна станція і базова обмінюються службовими повідомленнями, що містять тимчасові ідентифікаційні номери абонентів. При цьому забезпечується таємність перейменованих номерів і їхня належність конкретним абонентам.

Питання самоконтролю до II розділу

1. Які системи радіозв'язку відносяться до СПРВ?
2. В чому особливість передачі даних в системах персонального радіовиклику?
3. Із яких елементів складається система персонального радіовиклику?
4. Яку структуру має протокол *POCSAG*?
5. Навіщо кожний блок повідомлення в стандарті *POCSAG* поділений на кадри (фрейми) та яка його структура?
6. Що в стандарті *POCSAG* передбачено для виправлення помилок при передачі по радіоканалу?
7. Особливості основних протоколів систем персонального радіовиклику?
8. Для чого призначено програмування пейджерів та які існують способи програмування?
9. Визначити максимальну кількість користувачів, яких може обслуговувати оператор мережі персонального виклику (пейджингового зв'язку) стандарту *POCSAG*, якому виділена смуга частот 50 кГц в діапазоні УКХ, передача ведеться зі швидкістю 1200 біт/с, а кожний абонент за добу отримує 4 повідомлення довжиною приблизно 80 байт.
10. Які системи радіозв'язку відносяться до транкінгових систем?
11. Дайте класифікацію транкінгових систем.
12. Які елементи входять до однозонової транкінгової мережі та їх призначення?
13. Чим відрізняються функції та склад базової станції транкінгових і конвенціональних систем?
14. Які існують способи пошуку та призначення каналу в транкінгових системах (привести приклади стандартів, де застосовуються)?
15. Типи та особливості організації каналів керування в транкінгових системах (привести приклади стандартів, де застосовуються).
16. Поясніть архітектуру, можливості та основні характеристики транкінгової системи *MPT 1327*.
17. Поясніть архітектуру, можливості та основні характеристики транкінгової системи *TETRA*.
18. Як забезпечується інформаційна безпека в транкінговій системі *TETRA*?

ЧАСТИНА III. Системи стільникового зв'язку

8. Стільникові мережі зв'язку.

8.1. Загальні відомості. Класифікація систем.

Загальні відомості

Розвиток в 70-х роках стільникових систем сухопутного мобільного зв'язку (ССМЗ) поклав початок економному використанню спектра частот завдяки багаторазовому використанню виділеного частотного ресурсу практично на необмеженій території області чи регіону. Найбільш широке впровадження стільникових систем почалося після того, як були знайдені способи визначення місцезнаходження мобільних абонентів, а також можливість забезпечувати безперервність зв'язку рухомим абонентам при зміні клітин і зон обслуговування.

Назву *стільникових* системи отримали завдяки тому, що територія обслуговування поділяється на окремі комірки у формі стільника, в центрі яких розміщувалася *базова приймально-передавальна станція* БППС (*BTS - Base Transceiver Station*) з відносно невеликою потужністю, яка обслуговувала велику кількість абонентських станцій в межах одного стільника. Однакові частоти можуть повторно використовуватися в стільниках, відстань між якими визначається умовою поширення радіохвиль, припустимим рівнем завад і кількістю радіостанцій, розташованих навколо даного стільника.

Збільшення ємності мереж може здійснюватися або шляхом розширення частотного діапазону ("екстенсивний" метод), або зниженням рівня співканальних завад. Через дефіцит вільних частот перевагу віддають другому способу. Зниження співканальних завад, тобто завад з боку станцій, що працюють на тих же частотах, можливе завдяки застосуванню, крім секторних антен у стільниках, адаптивного розподілу каналів по стільниках з урахуванням поточного навантаження, автоматичного регулювання рівня випромінювання передавачів (адаптація за рівнем) і просторового рознесення при прийомі.

Для керування зв'язком мобільних абонентів між собою і з абонентами ТфМЗК використовується окремий *центр комутації мобільної служби* ЦКМС (*MSC - Mobile Switch Service Center*). У загальному вигляді фрагмент мережі стільникового зв'язку приведений на рис. 8.1.

Нині відомо багато різних стандартів стільникового радіозв'язку, серед яких можна виділити дві групи: аналогові і цифрові.

Існує три *методи багатостанційного доступу (розділення каналів)*:

- *FDMA - Frequency Division Multiple Access* (технологія множинного доступу з частотним розподілом каналів);
- *TDMA - Time Division Multiple Access* (технологія множинного доступу з часовим розподілом каналів);
- *CDMA - Code Division Multiple Access* (технологія множинного доступу з кодовим розподілом каналів).

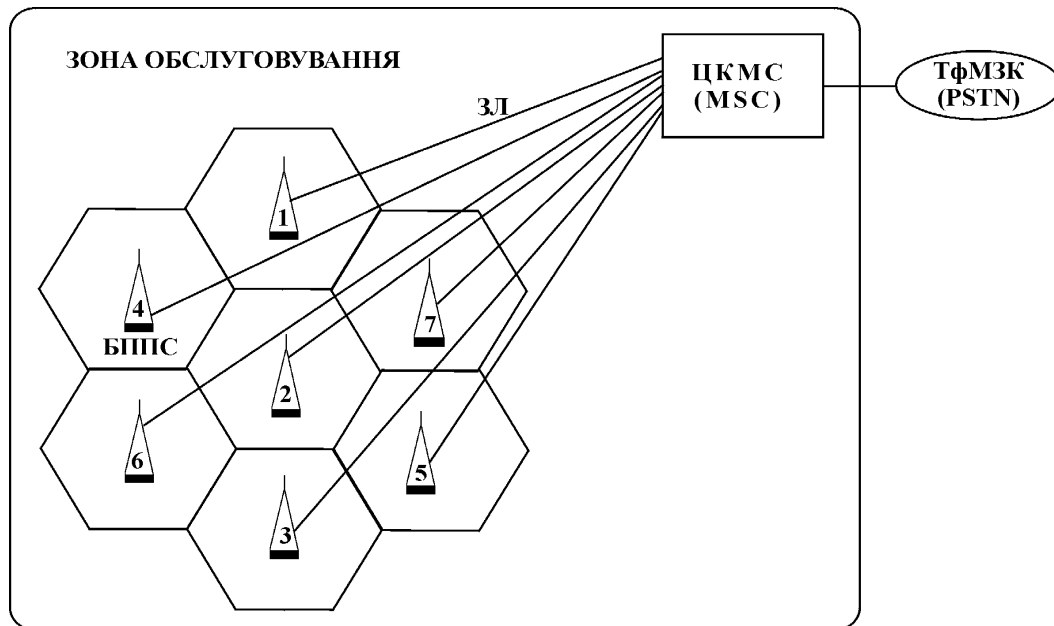


Рис. 8.1. Фрагмент стільникової мережі

У стандартах стільникового зв'язку використовують або один із цих методів, або їхню комбінацію. *FDMA* відносять до технологій стільникового зв'язку *першого покоління* (в Україні - *NMT-450/959*). *TDMA* відносять до технологій *другого покоління (2G)* і використовують для цифрових систем разом із *FDMA* (в Україні - *D-AMPS*, *GSM-900*, *GSM-1800*). Прикладом застосування технології *CDMA* є стандарт цифрових систем під однойменною назвою *CDMAone* (інша назва стандарту - *IS-95*), який відносять до технологій стільникового зв'язку *другого покоління*. Саме на технології *CDMA* були розроблені стандарти стільникового зв'язку *третього покоління (3G)*, до яких відносять:

- *UMTS/WCDMA*;
- *CDMA2000*.

Представником стандарту четвертого покоління (**4G**) є *LTE*.

8.2. Архітектура мереж стільникового зв'язку

Розглянемо архітектуру мереж стільникового зв'язку на базі стандарту *GSM* (рис. 8.2). Для діапазону частот 900 МГц і 1800 МГц система *GSM* має однакову структуру, яка складається з трьох основних субсистем:

- *субсистема базових станцій* – СБС (**BSS** – *Base Station Subsystem*);
- *комутаційна субсистема* – КС (**SSS** – *Switching Subsystem*);
- *субсистема управління та обслуговування* (**NMS** – *Network Management Subsystem*).

Кожна з цих субсистем має у своєму складі відповідні компоненти.

Так **субсистема базових станцій** складається з:

- модуля керування базовими станціями - *контролера базових станцій* – КБС (**BSC** – *Base Station Controller*);

- базових приймально-передавальних станцій - БППС (**BTS** – Base Transceiver Station).

Комутаційна підсистема має набір таких модулів:

- центр комутації мобільної служби – ЦКМС (**MSC**-Mobile Switching Center);
- центр перевірки автентичності (дійсності) абонента – ЦПА (**AUC**-Authentication Centre);
- бази даних у складі:
 - реєстра місцезнаходження відвідуваних (візитних) абонентів – РМВА (**VLR** - Visitor Location Register);
 - реєстра місцезнаходження базових (домашніх) абонентів – РМБА (**HLR**-Home Location Register);
 - реєстра ідентифікації мобільного обладнання – РІМО (**EIR**-Equipment Identity Register).

Субсистема **управління та обслуговування** складається з:

- центра експлуатації та технічного обслуговування – ЦЕ та ТО (**OMC** – Operation and Maintenance Centre);
- центра управління мережею (**NMC**-Network Management Center).

Функціональне спряження елементів системи здійснюється рядом стандартних інтерфейсів. Це дозволяє використовувати обладнання різних виробників. Всі мережеві функціональні компоненти в стандарті GSM взаємодіють на основі системи сигналізації SS N7, яка використовується як для зв'язку із зовнішніми стаціонарними мережами (PSTN, ISDN, PSPDN), так і для зв'язку з мережею рухомого зв'язку на основі обладнання NMT-450.

Розглянемо більш детально характеристики окремих підсистем.

Субсистема базових станцій (BSS) складається з контролера базових станцій (КБС) та базових приймально-передавальних станцій (БППС). КБС (BSC) здійснює управління декількома (звичайно 20...30) БППС (BTS). Субсистема базових станцій виконує наступні основні функції:

- управляє розподілом радіоканалів;
- контролює з'єднання та регулює їх чергу;
- забезпечує режим зі стрибками частоти;
- модулює та демодулює сигнали;
- кодує та декодує повідомлення;
- кодує мову;
- здійснює адаптацію швидкості передачі для мови, даних та виклику;
- формує чергу передачі повідомлень персонального виклику та інші.

Транскодер **TCE** (TransCoding Equipment) забезпечує перетворення вихідних сигналів каналу передачі мови та даних з ЦКМС (MSC) (64 кбіт/с ІКМ) до вигляду, який придатний для передачі по радіоінтерфейсу (13 кбіт/с або 6,5 кбіт/с).

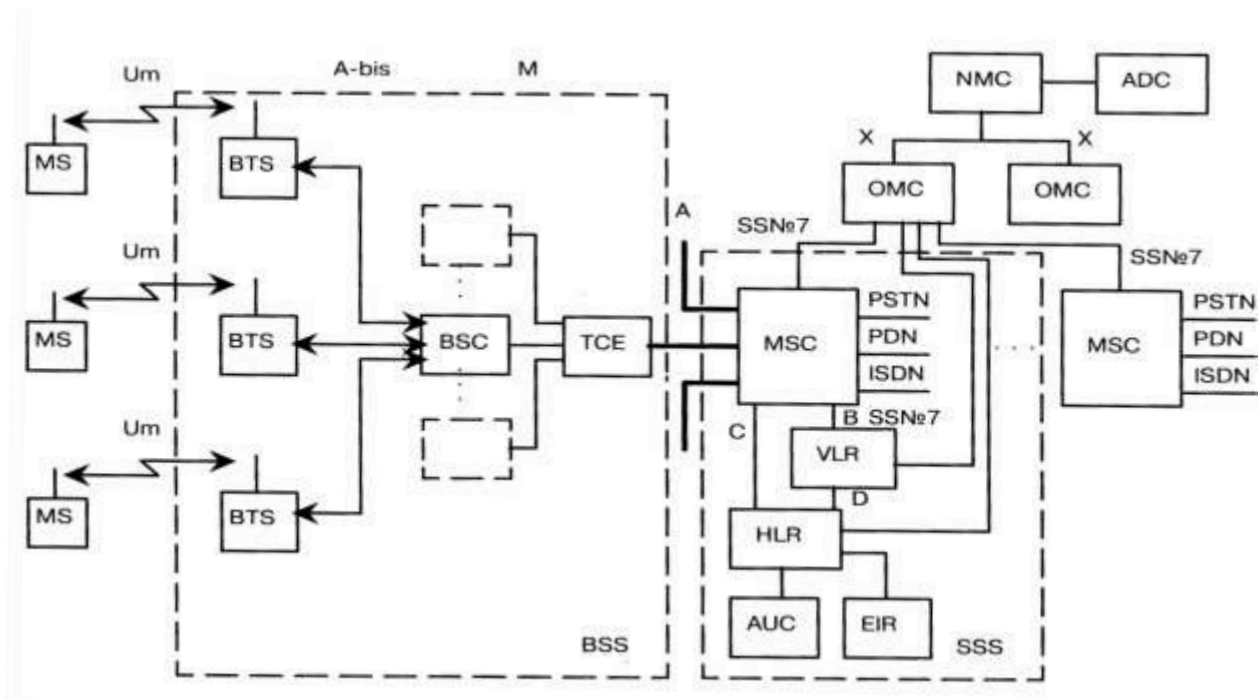


Рис. 8.2. Архітектура мережі стандарту GSM

Центр комутації мобільної служби (MSC) обслуговує групу стільників та забезпечує всі види з'єднань. ЦКМС є аналогічною *ISDN* комутаційній станції та представляє собою інтерфейс між фіксованими мережами (*PSTN*, *ISDN*, *PSPDN*) і мережею рухомого зв'язку.

При цьому ЦКМС здійснює:

- маршрутизацію і функції управління викликів;
- „естафетну передачу” для безперервного зв'язку при переміщенні мобільних станцій (*MS*) з одного стільника в інший;
- переключення робочих каналів в стільнику при появі завад або несправностей;
- постійне слідування за мобільними станціями, використовуючи реєстри місцезнаходження *HLR* і переміщення *VLR*;
- формує дані, які необхідні для калькуляції за надані абонентам послуги;
- складає статистичні дані, які необхідні для контролю роботи і оптимізації мережі;
- підтримує процедури безпеки, які застосовуються для управління доступом до радіоканалів.

Реєстрація місцезнаходження мобільних станцій потрібна для забезпечення доставки виклику абонентам, які рухаються, від абонентів ТфМЗК або інших абонентів даної мережі. В цьому процесі приймають безпосередню участь реєстри місцезнаходження *HLR* і переміщення *VLR*. В цих реєстрах зберігаються як *довготривалі*, так і *тимчасові* дані.

Практично реєстр *HLR* представляє собою довідкову базу даних про постійно прописаних в мережі абонентів. Реєстр *HLR* містить наступну довготривалу інформацію:

- міжнародний ідентифікаційний номер мобільної станції – ***IMSI***;

- номер мобільної станції в міжнародній мережі *ISDN* - ***MSISDN***;
- категорія мобільної станції;
- ключ автентифікації;
- склад послуг зв'язку;
- спеціальна інформація про маршрутизацію;
- заборона вхідного та вихідного виклику;
- дані про роумінг абонента, включаючи тимчасовий ідентифікаційний номер мобільної станції – *TMSI* та інші.

До цих даних мають дистанційний доступ *MSC* та *VLR* даної мережі або інших мереж для забезпечення міжмережевого роумінгу абонентів.

За допомогою **регістра *VLR*** забезпечується функціонування мобільної станції при переміщенні за межі зони, яка контролюється реєстром *HLR*. Регістр *VLR* містить ті ж самі дані, що і *HLR*, але вони знаходяться в ньому до того часу, доки ця мобільна станція знаходиться в зоні, яка контролюється даним *VLR*.

В мережі *GSM* стільники об'єднуються в географічні зони (*LA-Location Area*), яким призначаються свої ідентифікаційні номери (*LAC*). Кожний *VLR* містить дані про абонентів декількох *LA*. При переміщенні абонента здійснюється поновлення даних про нього в *VLR* та *HLR*. Крім того, *VLR* здійснює управління розподілом тимчасових ідентифікаційних номерів мобільних станцій – *TMSI* та забезпечує присвоєння номеру (*MSRN-Mobile Station Roaming Number*). Регістр *VLR* управляє процедурою автентифікації під час виклику.

Доступ до реєстру *VLR* здійснюється через номери *IMSI*, *TMSI* або *MSRN*. Таким чином, реєстр *VLR* дозволяє виключити постійні запити до реєстру *HLR* та зменшити час обслуговування виклику при переміщенні мобільної станції.

Центр перевірки автентичності перевіряє повноваження абонента та керує його доступом до мережі на основі бази даних, яку містить реєстр автентифікації обладнання (*EIR*). ЦПА складається з декількох блоків і здійснює формування ключів та алгоритму автентифікації.

Центр експлуатації та технічного обслуговування є центральним елементом мережі *GSM*, який забезпечує контроль та управління компонентами мережі та якість її роботи. Він забезпечує:

- функції обробки аварійних сигналів;
- реєстрацію відомостей про аварійну ситуацію компонентів мережі;
- перевірку стану обладнання мережі та проходження виклику мобільної станції;
- управління навантаженням в мережі.

ЦЕ і ТО з'єднуються з іншими компонентами мережі *GSM* по каналам пакетної передачі (протокол *X.25*).

Центр управління мережею дозволяє забезпечити раціональне ієрархічне управління мережею *GSM*. Ця інформація концентрується в **адміністративному центрі (*ADC*)**.

8.3. Аналогові стандарти стільникового зв'язку.

Перші мережі стільникового радіозв'язку реалізовувалися аналоговими методами. Відомі дев'ять основних стандартів аналогових систем стільникового зв'язку:

- *AMPS* (США, 1981) – у діапазоні 800 МГц;
- *HCMT* (Японія, 1979, 1988 – нова) – 900 МГц;
- *NMT-450* (Скандинавські країни, 1981) – 450 МГц;
- *NMT-900* (Скандинавські країни, 1986) – 900 МГц;
- *C-450* (Німеччина, 1985) – 450 МГц;
- *TACS* (Англія, 1985) – 900 МГц;
- *ETACS* (Англія, Лондон, 1987) ф– 900 МГц;
- *RTMS-101H* (Італія, 1985) – 450 МГц;
- *Radiocom-2000* (Франція, 1985) – 200 МГц та 400 МГц.

В Україні використовувався стандарт *NMT*. Розглянемо його деякі особливості.

NMT-450 (NMT-450i) - Nordic Mobile Telephone

Аналоговий стандарт *NMT-450* розроблений у Скандинавії. Використовує частотний діапазон 453...457,5 МГц для радіозв'язку мобільного терміналу з базовою станцією (канал прийому) і частотний діапазон 463...467,5 МГц - для радіозв'язку базової станції з мобільним терміналом (канал передачі). Дуплексний рознос каналів прийому і передачі дорівнює 10 МГц. Частотний діапазон забезпечують 180 (225) каналів зв'язку шириною 25 (20) кГц кожний. Середнє число каналів, які виділяються базовій станції для обслуговування абонентів, дорівнює 30. Радіус стільника радіопокриття дорівнює 2...40 км. Характерною рисою стандарту є те, що всі мобільні станції цілком сумісні з усіма базовими станціями системи в будь-якій країні, де використовується цей стандарт. Удосконалена версія стандарту одержала позначення *NMT-450i*, і його функціональні характеристики доведені до рівня стандарту *NMT-900*.

NMT-900 - Nordic Mobile Telephone

Аналоговий стандарт використовує частотний діапазон 890...915 МГц для радіозв'язку мобільного терміналу з базовою станцією (канал прийому) і частотний діапазон 935...960 МГц - для радіозв'язку базової станції з мобільним терміналом (канал передачі). Дуплексний рознос каналів прийому і передачі дорівнює 45 МГц. Частотний діапазон забезпечує 1000 каналів зв'язку шириною по 25 кГц кожний. Радіус стільника радіопокриття дорівнює 2...20 км. Система базується на специфікації стандарту *NMT-450*. Основна відмінність полягає в тому, що з підвищенням частоти стає можливим зменшення габаритів мобільних станцій, а також розширення спектра послуг зв'язку і керування. Крім того, у *NMT-900* додається нова структура робочого кадру пакету службової інформації, куди включаються додаткова інформація, префікси і лінійні сигнали. Змінено ту частину специфікації, що

відноситься до взаємодій центру комутації мобільного зв'язку *MSC* (*Mobile Switching Centre*) з базовою станцією.

8.4. Цифрові стандарти стільникового зв'язку.

У 80-х роках у Європі, США та Японії приступили до інтенсивного вивчення принципів побудови перспективних цифрових стільникових мереж. На даний час широке поширення знайшли такі стандарти:

- загальноєвропейський стандарт *GSM*;
- американський стандарт *ADC (D-AMPS)*;
- японський стандарт *JDC*;
- стандарт *CDMAone*.

В Україні знайшли застосування стандарти *GSM*, *D-AMPS* та *CDMAone*. Вони відносяться до систем стільникового зв'язку другого покоління (2G). Основні характеристики цих стандартів приведені в таблиці 8.1.

D-AMPS - Digital Advanced Mobile Phone Service **(цифрова удосконалена мобільна телефонна служба)**

Цифрова модифікація аналогового стандарту *AMPS*. Стандарт використовує частотний діапазон 824...849 МГц для радіозв'язку мобільного терміналу з базовою станцією (зворотний канал) і частотний діапазон 869...894 МГц - для радіозв'язку базової станції з мобільним терміналом (прямий канал). У частотному діапазоні розміщуються 833 канали зв'язку при ширині смуги частот кожного каналу 30 кГц. Радіус стільника дорівнює 0,5...20 км. Для перетворення аналогового мовного сигналу в цифрову форму використовується кодек *VSELP*. Швидкість перетворення мови кодеком складає 8 кбіт/с. Потім кодовані дані піддаються перемежуванню і квадратурній модуляції, а швидкість передачі інформації в прямому і зворотному каналах складає 48 кбіт/с.

GSM-900 - Global System for Mobile Communications **(глобальна система мобільного зв'язку)**

Цифровий стандарт використовує частотний діапазон 890...915 МГц для радіозв'язку мобільного терміналу з базовою станцією (зворотний канал) і частотний діапазон 935...960 МГц - для радіозв'язку базової станції з мобільним терміналом (прямий канал). У частотному діапазоні розміщуються 124 каналів зв'язку при ширині смуги частот кожного каналу 200 кГц. Дуплексний рознос частот прийому і передачі дорівнює 45 МГц. Радіус стільника складає 0,5...35 км. Для перетворення аналогового мовного сигналу в цифрову форму використовується кодек *RPE-LTP* з регулярним імпульсним збудженням і швидкістю перетворення мови 13 кбіт/с. Потім кодовані дані піддаються перемежуванню і квадратурній модуляції, у підсумку швидкість модуляції цифрового потоку в прямому і зворотному каналах складає 270 кбіт/с.



Для організації безпеки передачі повідомлень здійснюється шифрування повідомлень за алгоритмом шифрування з відкритим ключем. У стандарті *GSM* для максимального захисту від несанкціонованого підключення застосовується спеціальний модуль відповідності абонента - *SIM*-карта. Ця картка, у вбудованій мікросхемі якої зберігається спеціальна інформація про конкретного абонента, видається йому при підключенні телефону і може бути використана з будь-якою моделлю мобільного апарату стандарту *GSM*.

GSM-1800 (DCS-1800 - Digital Cellular Standard)

Це подальший розвиток стандарту *GSM*. Для організації зворотних і прямих каналів використовують діапазони частот 1710...1785 МГц і 1805...1880 МГц. Головна відмінність цієї системи полягає в енергетичних характеристиках обладнання і мікросільниковій топології побудови мережі. Радіус мікросільника складає може складати 100...600 м. Мікросільникова структура припускає обслуговування абонентських станцій, що повільно переміщуються, наприклад, пішоходів, чи мережі напівфіксованого зв'язку, що діє в межах будинку, вулиці, площі, вокзалів. Поліпшення якості обслуговування можливе при створенні інтегрованих мереж, що використовують як устаткування стандарту *GSM-900* (для абонентів високої рухливості), так і *DCS-1800* (для абонентів низької рухливості) на комбінованих базових станціях з уніфікованим комутаційним і керуючим устаткуванням. При цьому використовуються дводіапазонні абонентські термінали, що забезпечують автоматичний вибір каналів і перехід з одного діапазону частот в іншій.

Цифрові стандарти стільникового зв'язку

Таблиця 8.1

Характеристика	GSM 900 (DCS-1800)	CDMA (IS-95)	D-AMPS (ADC)
Метод доступу	(FDMA)/TDMA	CDMA	TDMA
Робочий діапазон частот, ПРД БС/ПРД МС, МГц	935-960/890-915 (1805-1880/ 1710-1785)	869-894/824-840	869-894/824-849
Дуплексне рознесення, МГц	45(95)	45	45
Рознесення каналів, кГц	200	1250	30
Кількість фізичних каналів в одному частотному	8 (16)	64	3
Еквівалентна смуга частот на один фізичний канал, кГц	25 (12,5)	19,5	10
Максимальна швидкість руху мобільної станції, км/год	250(130)	н/д	н/д
Вид модуляції	0,3 GMSK	QPSK	π/4 DQPSK
Швидкість передачі інформації в частотному каналі, біт/с	270, 833		48
Швидкість перетворення мови, кбіт/с	13 (6,5)	9,6(4,8)	8
Алгоритм перетворення мови	RPE-LTP	CELP	VSELP
Радіус стільника, км	0,5-35,0	0,5-25,0	0,5-20,0

9. Організація каналів доступу

9.1. Смуги частот стільникового зв'язку.

Для організації частотних каналів в стандарті GSM передбачені наступні діапазони частот: 850 МГц, 900 МГц, 1800 МГц, 1900 МГц.

В існуючих системах стільникового зв'язку використовується частотний розподіл дуплексних каналів (*FDD*), тобто для передачі з базової станції (*прямий канал* або канал «вниз») і з мобільної станції (*зворотний канал* – або канал «вгору») виділяються окремі смуги частот. Прямі канали розміщуються в більш високому діапазоні частот ніж зворотні. Смуги частот стандартів стільникового зв'язку представлені в таблиці 9.1.

Смуги частот, які використовуються в стільниковому зв'язку
Таблиця 9.1

Стандарт	Частота, МГц		Довжина хвилі, см	
	Зворотний канал	Прямий канал	Зворотний канал	Прямий канал
<i>NMT-450</i>	453...457,5	463...467,5	65,6...66,3	63,2...64,9
<i>AMPS/D-AMPS</i>	824...849	869...894	35,4...36,4	33,6...34,6
<i>GSM-900(NMT-900)</i>	890...915	935...960	32,8...33,8	31,2...32,1
<i>GSM-1800</i>	1710...1785	1805...1880	16,8...17,6	16,0...16,6
<i>CDMAone</i>	824...849	869...894	35,4...36,4	33,6...34,6

Особливості частотного діапазону систем стільникового зв'язку:

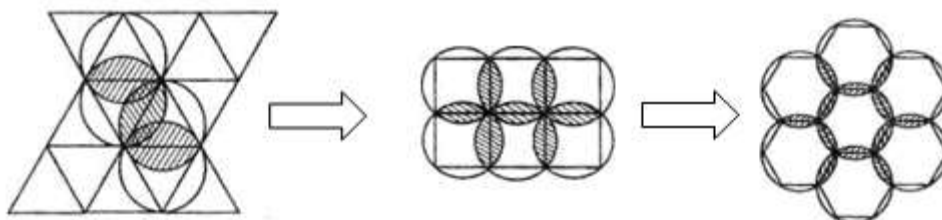
1. Тверда обмеженість виділених смуг частот, що вміщують у себе невелике число частотних каналів. Це потребує найбільш раціонального використання наявного каналного ресурсу для підвищення ємності мережі зв'язку.

2. В стільниковому зв'язку використовуються смуги частот, які відносяться до дециметрового діапазону. Дециметрові радіохвилі поширюються в основному в межах прямої видимості. Дифракція на цих частотах виражена слабо, а молекулярного поглинання і поглинання в гідрометеорах (сніг, дощ) практично немає. Однак близькість поверхні землі і наявність перешкод (будинків), особливо в умовах міста, приводить до появи відбитих сигналів, які інтерферують між собою і з сигналом, що пройшов по прямому шляху. Це явище називається *багатопроменевим розповсюдженням сигналів*. Відбиття від поверхні землі приводить до того, що потужність прийнятого сигналу змінюється пропорційно не другого ступеня відстані між передавачем і приймачем, як при поширенні у вільному просторі, а пропорційно четвертого ступеня цієї відстані, тобто *напруженість поля змінюється пропорційно квадрату відстані*. Інтерференція декількох сигналів, що пройшли різними шляхами, викликає явище замирань результуючого сигналу, при якому інтенсивність прийнятого сигналу змінюється в значних межах при переміщенні рухомої станції. Крім того, виникають спотворення, що є

наслідком накладення декількох порівняних по інтенсивності сигналів, зміщених один щодо іншого в часі, що можуть приводити до помилок у прийнятій інформації. Багатопроменеве поширення істотно затрудняє розрахунок інтенсивності сигналів в залежності від віддалення від базової станції, а такий розрахунок необхідний для коректного проектування систем.

9.2. Структура клітин та принцип повторного використання частот.

Для оптимального поділення території обслуговування на комірки, в центрі яких розміщуються базові станції, з точки зору геометричних фігур можуть використовуватися тільки три рівносторонні фігури: трикутник, квадрат та шестикутник. В аналогових системах стільникового зв'язку антени БС мали кругову діаграму спрямованості і розміщувалися в центрі комірок.



Антени з круговою діаграмою спрямованості в трикутній і квадратній комірках створюють великі спільні площі, які перекривають сусідні комірки. Це створює несприятливі електромагнітні умови для мобільних абонентів, а також невизначеність їх місцезнаходження. Найбільш оптимальною фігурою є рівносторонній шестикутник, який по формі близький до круга, а тому вплив випромінювання БС на сусідню чарунку буде мінімальним. Звідси територія у вигляді шестикутника має назву стільника, а вид зв'язку – стільниковий.

Основним принципом стільникового зв'язку є повторне використання частот у несуміжних стільниках, ідея якого полягає в тому, що в сусідніх стільниках системи використовуються різні частотні канали, а через декілька стільників ці канали повторюються. Це дозволяє при обмеженій загальній кількості каналів охопити системою завгодно велику зону обслуговування й істотно підвищити ємність системи.

Кластером називається група сусідніх стільників з різними наборами частотних каналів, в яких представлені всі робочі канали, що виділені даній мережі (**важливо: в стільниках одного кластера частотні канали не повторюються!!!**).

При 3-елементному кластері (рис.9.1) стільники з однаковими наборами частотних каналів повторюються дуже часто. Це приводить до

зростання співканальних завад, тобто завад від станцій системи, які працюють на тих же частотних каналах, але в інших стільниках.

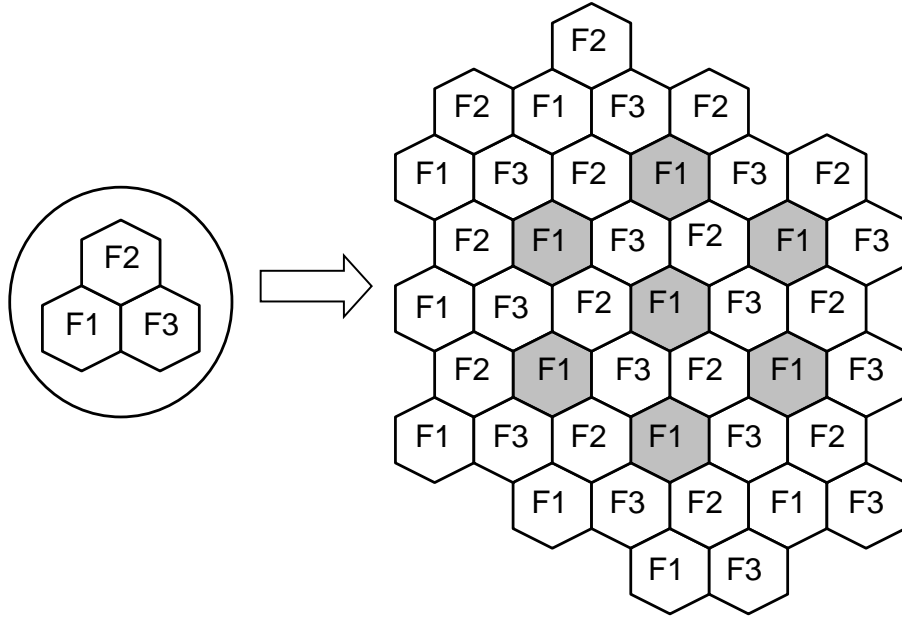


Рис. 9.1. Схема з триелементним кластером

У цьому відношенні більш вигідні кластери з великим числом елементів (наприклад, на рис. 9.2 зображена схема із семиелементним кластером). На практиці це число може досягати п'ятнадцяти.

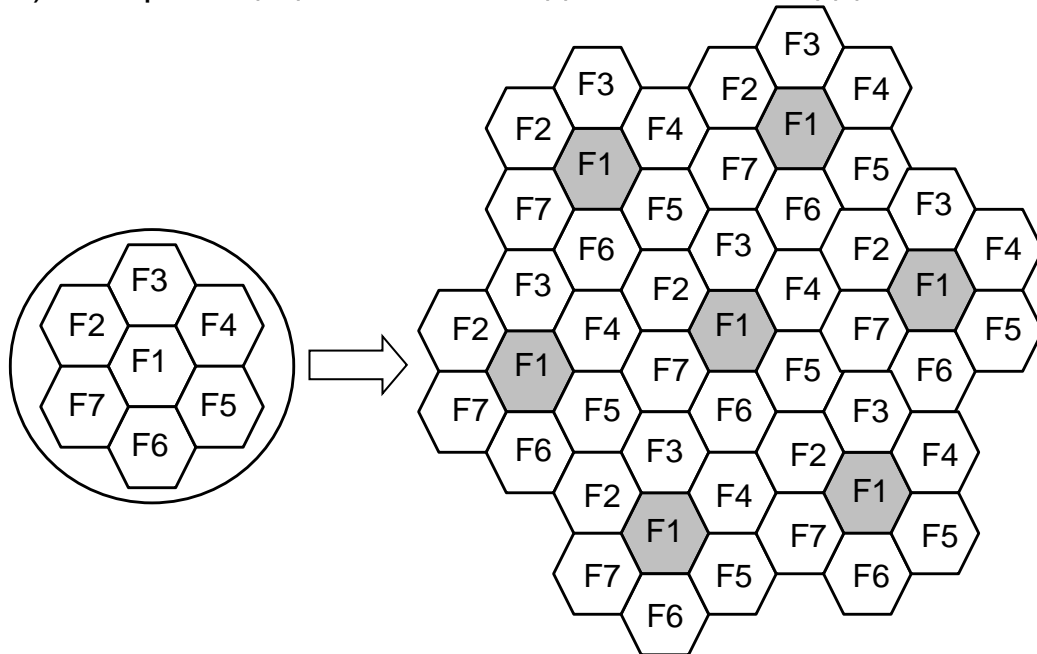


Рис. 9.2. Схема з семиелементним кластером

Збільшення числа елементів у кластері, яке вигідне у відношенні зниження рівня співканальних завад, приводить до пропорційного зменшення кількості частотних каналів, які можуть бути використані в одному стільнику. Тому, практично, число елементів у кластері повинне *вибиратися мінімально можливим для забезпечення допустимого відношення сигнал/завада* (рис.9.3).

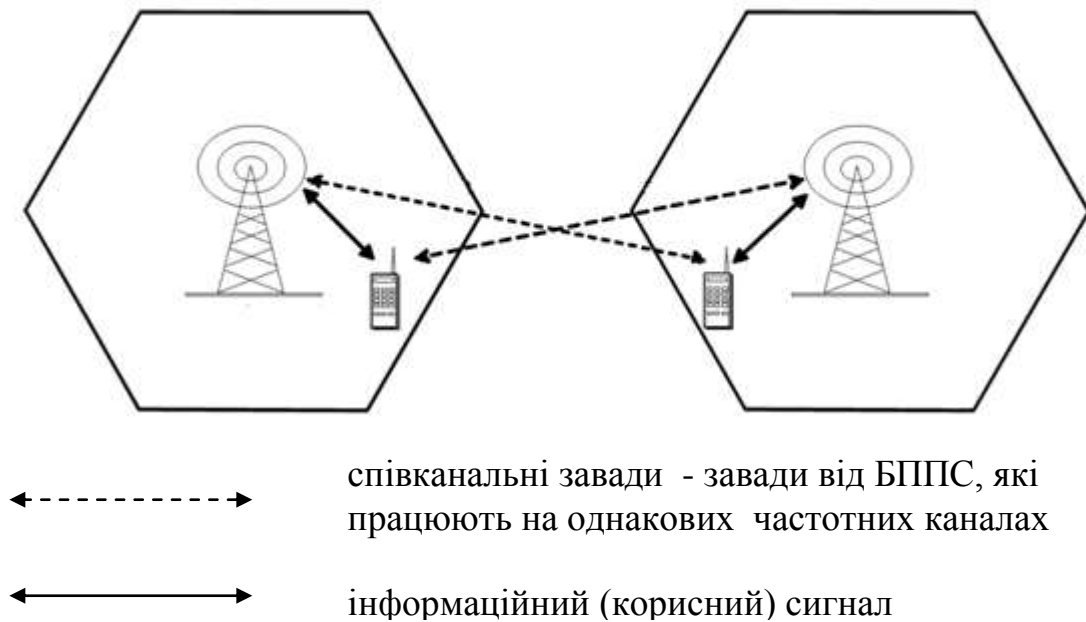


Рис. 9.2. Інтерференція в стільниках

Нагадаємо, що вид модуляції, способи кодування і формування сигналів у каналах зв'язку, які прийняті в стандарті *GSM*, забезпечують прийом сигналів із відношенням сигнал/завада ($C/I \geq 9$ дБ (C/I – *Carrier to Interference Ratio* – відношення енергії корисного інформаційного сигналу до енергії інтерферованих сигналів від БППС, що працюють на однакових частотних каналах), у той час як в аналогових системах той же показник повинен дорівнювати 17...18 дБ.

Суміжні БС, що використовують різні набори частотних каналів, створять групу з C станцій (число стільників у кластері). Якщо кожній БС виділяється набір з N каналів із шириною смуги кожного F_k , то загальна ширина смуги, яку займає система стільникового зв'язку, складе

$$F_c = F_k \cdot N \cdot C$$

Звідси число каналів зв'язку в стільнику визначається виразом:

$$N = \frac{1}{C} \cdot \frac{F_c}{F_k},$$

де F_c – ширина смуги системи.

Таким чином, величина C визначає мінімально можливе число каналів у системі, тому її часто називають *частотним параметром системи*, або *коефіцієнтом повторного використання частот*.

Важливим питанням є визначення віддаленості (захисного інтервалу) двох стільників, які використовують однакові частоти, для уникнення інтерференції.

В шестикутній (гексагональній) схемі можливі тільки наступні значення C – числа стільників в мінімальному фрагменті (кластері):

$$C = I^2 + J^2 + (I \times J),$$

де $I, J = 0, 1, 2, 3$.

Отже, число C може дорівнювати: 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21 Це число називають ще *кратністю використання частот*.

Базові станції, на яких допускається повторне використання виділеного набору частотних каналів, повинні бути віддалені одна від одної на відстань D , яка називається "захисним інтервалом" (рис. 9.3), пов'язана з числом стільників C у кластері та розмірів стільника:

$$D = R\sqrt{3 \cdot C}$$

де R – радіус стільника (радіус окружності, описаної біля правильного шестикутника), яка дорівнює стороні шестикутника.

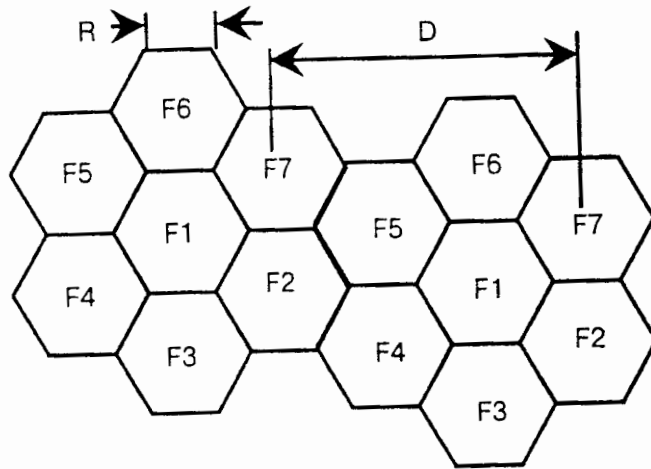


Рис. 9.3.

Коефіцієнт C не залежить від числа каналів у наборі і збільшується в міру зменшення радіуса стільника. Таким чином, *при використанні стільників менших радіусів є можливість збільшення повторюваності частот*.

Параметр $q = \frac{D}{R} = \sqrt{3 \cdot C}$ називається коефіцієнтом зменшення співканальних завад або *коефіцієнтом міжканального повторення*.

Розміри стільника (радіус R) визначають захисний інтервал D між стільниками, у яких ті ж самі частоти можуть бути використані повторно. Величина захисного інтервалу D , крім уже перерахованих факторів, залежить також від припустимого рівня завад і умов поширення радіохвиль. У припущенні, що інтенсивність викликів у межах усієї зони однакова, стільники вибираються одного розміру. Розмір зони обслуговування БС, що виражається через радіус стільника R , визначає також число абонентів N , здатних одночасно вести переговори на всій території обслуговування. Отже, зменшення радіуса стільника дозволяє не тільки підвищити ефективність використання виділеної смуги частот і збільшити абонентську ємність системи, але і зменшити потужність передавачів і чутливість приймачів БС і МС. Це, у свою чергу, поліпшує

умови ЕМС засобів стільникового зв'язку з іншими радіоелектронними засобами і системами.

З іншого боку, надмірне зменшення радіуса осередків приводить до значного збільшення числа перетинань мобільними абонентами меж стільників, що може викликати перевантаження пристроїв керування і комутації системи. Крім того, можливе збільшення числа випадків виникнення взаємних завад. І, нарешті, при малих значеннях R у реальних умовах навіть незначне відхилення положення антени щодо геометричного центру стільника може викликати відчутне зменшення відношення сигнал/завада в системі. У зв'язку з цим у реальних умовах при виборі величини R доводиться враховувати всі перераховані вище обставини і знаходити компромісне рішення.

Спосіб організації повторного використання частот із застосуванням антен БС із круговими діаграмами спрямованості припускає передачу сигналу однакової потужності в усіх напрямках, що для абонентської станції еквівалентно прийому завад від усіх БС із усіх напрямків.

Ефективним способом зниження рівня завад в стільниковій мережі може бути використання спрямованих секторних антен з вузькими діаграмами спрямованості. У секторі такої спрямованої антени сигнал випромінюється переважно в одну сторону, а рівень випромінювання в протилежному напрямку скорочується до мінімуму. Розподіл стільників на сектори дозволяє частіше застосовувати частоти в стільниках повторно.

При використанні спрямованих (у горизонтальній площині) антен із шириною діаграми спрямованості 120° або 60° шестикутний стільник розбивається на 3 або 6 секторів, у кожному з яких використовуються свої набори частотних каналів (рис. 9.4). Можливі й інші варіанти дроблення осередків, причому цей прийом широко використовується для ділянок мережі з напруженим трафіком в інтересах забезпечення необхідної ємності системи.

Високу ефективність використання смуги частот і, отже, найбільше число абонентів мережі, що працюють у цій смузі, забезпечує розроблений фірмою *Motorola* спосіб повторного використання частот. При реалізації цього способу (рис. 9.5) кожний частотний канал використовується двічі в межах кластера, який складається із 4 стільників. БС кожної з них може працювати на 12 частотах, використовуючи антени з діаграмою спрямованості шириною 60° .

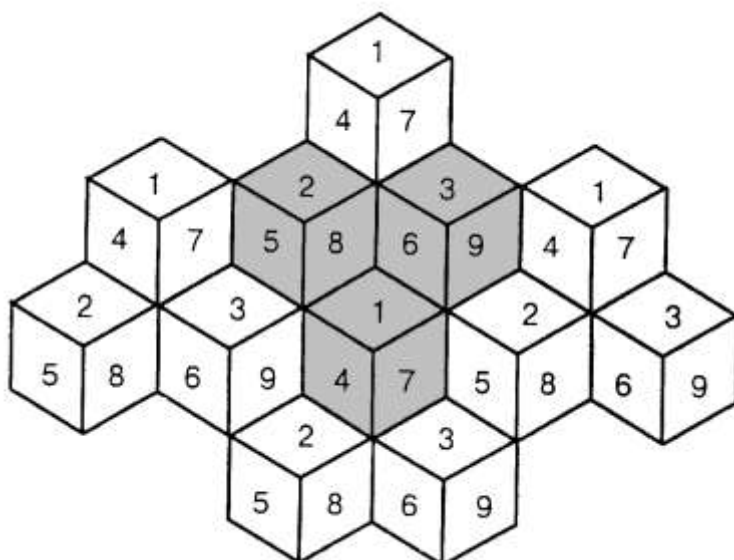


Рис. 9.4. Модель повторного використання частот в трисекторних стільниках

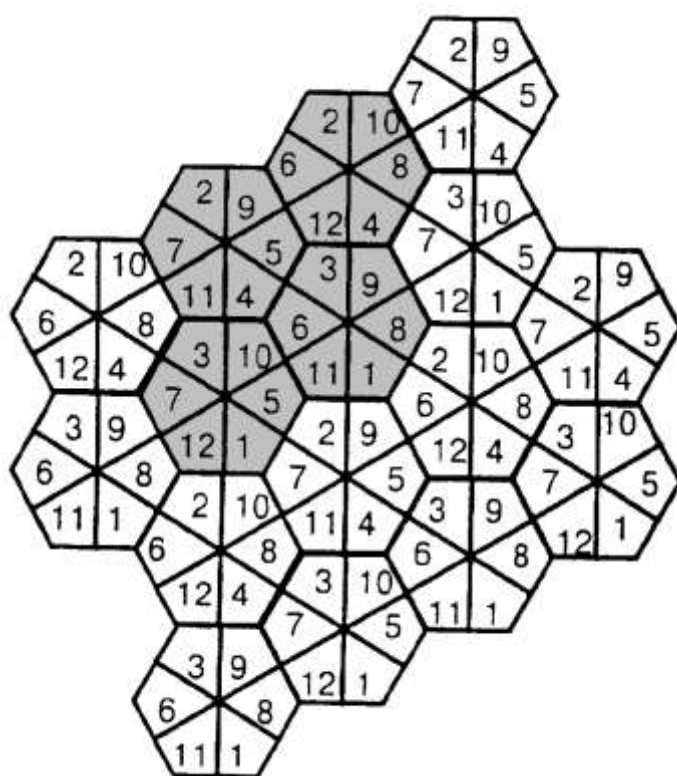


Рис. 9.5. Модель повторного використання частот в шестисекторних стільниках

Поділити територію, що обслуговується, на стільники можна двома способами:

- оснований на вимірі статистичних характеристик поширення сигналів у системах зв'язку;
- оснований на вимірі або розрахунку параметрів поширення сигналу для конкретного району.

При реалізації *першого способу* вся територія, що обслуговується, розділяється на однакові за формою зони і за допомогою закону статистичної радіофізики визначаються їхні припустимі розміри і відстані до інших зон, у межах яких виконуються умови припустимого взаємного впливу.

Для оптимального рішення, тобто без перекриття чи пропусків ділянок, поділ території на стільники можуть бути використані тільки три геометричні фігури: трикутник, квадрат і шестикутник. Найбільш придатною фігурою є шестикутник, тому що шестикутна форма щонайкраще вписується в кругову діаграму спрямованості БС, встановлену в центрі осередку. При першому способі інтервал між зонами, у яких використовуються однакові робочі канали, звичайно виходить більше необхідного для підтримки взаємних завад на припустимому рівні.

Більш прийнятний *другий спосіб поділу на зони*. У цьому випадку ретельно вимірюють або розраховують параметри системи для визначення мінімального числа БС, що забезпечують задовільне обслуговування абонентів по всій території, визначають оптимальне місце розташування БС із урахуванням рельєфу місцевості, розглядають можливість використання спрямованих антен, пасивних ретрансляторів і суміжних центральних станцій у момент пікового навантаження.

9.3. Способи збільшення пропускної спроможності мереж

Можна виділити наступні способи підвищення ємності в системах стільникового зв'язку:

1. *Удосконалювання методів обробки сигналів* (зокрема, перехід від аналогової обробки до цифрової), що супроводжується переходом до більш ефективних методів множинного доступу – від *FDMA* до *TDMA* і *CDMA*, а в межах *TDMA* – перехід від повношвидкісного кодування мови до напівшвидкісного.

2. *Дроблення стільників*, тобто перехід до менших комірок у районах з інтенсивним трафіком при тому ж коефіцієнті повторного використання частот. Число базових станцій (БС) при цьому відповідно збільшується, а потужність випромінювання (як для БС, так і для МС) знижується. Практично стільники з радіусом менше 300...500 м незручні, тому що надмірно зростає потік передач обслуговування. Вихід може бути знайдений у використанні багаторівневих (ієрархічних) схем побудови стільникової мережі з обслуговуванням у великих осередках (макростільниках) абонентів, які швидко переміщуються (автомобілістів), а в більш дрібних (мікростільники, пікостільники) – малорухомих абонентів, наприклад, покупців у межах торгового центру.

3. *Використанні на БС секторних антен*. При цьому на БС замість антени з круговою діаграмою направленості застосовують декілька секторних антен, які дозволяють концентрувати випромінювання в

межах сектора і зменшувати до мінімуму випромінювання в інших напрямках та використовувати у кожному з секторів своїх частотних каналів. Наприклад, поділ стільника на три сектори (при 120-градусних антенах) дозволяє використовувати в стільнику 3 групи різних частотних каналів. Більша ефективність досягається при використанні секторів у 60° (див. рис. 9.5).

4. *Використання адаптивного призначення (розподілу) каналів у методах доступу з частотним і часовим поділом каналів (FDMA і TDMA).* При даному підході частотні канали (усі чи частково) знаходяться в оперативному розпорядженні центру комутації (ЦК), що виділяє їх для користування окремим стільникам (БС) по мірі надходження заявок (викликів), тобто відповідно до реальної інтенсивності трафіку, але при дотриманні необхідного територіально-частотного розносу. Такий адаптивний алгоритм складніший, але він може забезпечити підвищення ємності системи за рахунок гнучкого відстеження флуктуацій трафіку. Алгоритми адаптивного призначення каналів використовуються в безпроводовій телефонії, але в стільниковому зв'язку широкого поширення не одержували. Адаптивним, власне кажучи, є призначення фізичних каналів у методі CDMA, що дозволяє в деяких межах перерозподіляти навантаження між різними осередками.

5. *Розширення виділеної смуги частот.* Але в умовах твердих обмежень на доступні смуги частот даний підхід не є перспективним.

10. Формування каналів в мережах стільникового зв'язку стандарту GSM

10.1. Загальні положення.

Частотний канал – це смуга частот, яка призначена для передачі інформації одного каналу зв'язку. При використанні методу TDMA в одному частотному каналі розміщується декілька фізичних каналів.

Фізичний канал в системі TDMA – це набір (пакет) часових слотів із визначеним номером в послідовності кадрів радіоінтерфейсу.

Логічні канали розрізняють по виду інформації, яка передається по фізичному каналу. У фізичному каналі може бути реалізований один із двох видів логічних каналів – *канал трафіку* або *канал управління*.

10.2. Організація частотних та фізичних каналів

В стандарті GSM-900 для передачі інформації прямого каналу від БС (канал „вниз” – *downlink*) виділяється смуга частот 935...960 МГц, а зворотного – від МС (канал „вверх” – *uplink*) – 890...915 МГц. Крім того, використовуються наступні версії системи GSM: *E-GSM*, *GSM-1800*, *GSM-850*, *PCS(Personal Communications System)-1900*. Діапазони 850/1900 МГц використовуються в США, Канаді та деяких країнах Латинської Америки.

Параметр	Стандарт		
	GSM-900	E-GSM-900 (E - Extended)	GSM-1800
Піддіапазон прямих каналів (БС→МС), МГц	935...960	925...960	1805...1880
Піддіапазон зворотних каналів (МС→БС), МГц	890...915	880...915	1710...1785
Дуплексне рознесення, МГц	45	45	95
Ширина піддіапазона, МГц	25	35	75
Ширина частотного каналу, кГц	200	200	200
Кількість каналів	124	174	374
Нумерація каналів (ARFCN)	1...124	975...1023, 0...124	512...885

Виділена смуга частот розподіляється на **частотні канали**. Рознесення частотних каналів складає 200 кГц, що дозволяє організувати в стандарті GSM-900 $n=124$ частотних каналів FDMA. Частотні канали групуються парами, створюючи дуплексний канал із рознесенням $\Delta F_D = 45$ МГц. Ці пари частот із рознесенням 45 МГц залишаються і при стрибках, які використовуються для боротьби з явищем завмирання (федінгом).

Якщо позначити $F_{зв}(n)$ – частоту носія зворотного каналу в смузі 890...915 МГц, а $F_{пр}(n)$ – частоту носія прямого каналу в смузі 935...960

МГц, то *центральні частоти каналів* будуть визначатись наступним співвідношенням:

$$\left. \begin{aligned} F_{зв}(n) &= 890 + 0,2 * n, \text{ МГц} \\ F_{пр}(n) &= F_{зв}(n) + \Delta F_D, \text{ МГц,} \\ &\text{або} \\ F_{пр}(n) &= 935 + 0,2 * n, \text{ МГц,} \end{aligned} \right\}$$

де n - номер каналу (**ARFCN** - *Absolute Radio Frequency Channel Number*)
 $1 \leq n \leq 124$, $\Delta F_D = 45$ МГц

Для прикладу визначимо несучі частоти каналів при $n = 1, 2, \dots, 124$ (табл. 10.1).

Таблиця 10.1

$n(\text{ARFCN})$	$F_{зв}(n), \text{ МГц}$	$F_{пр}(n), \text{ МГц}$
1	890,2	935,2
2	890,4	935,4
...
124	914,8	959,8

Примітка: з обох сторін піддіапазонів прямого та зворотного каналів знаходяться захисні інтервали по 100 кГц (тобто, наприклад, прямий канал №1 знаходиться в смузі частот 935,1...935,3 МГц).

В залежності від очікуваного трафіка кожній БППС виділяється відповідна кількість частотних каналів, як правило, від 1 до 16.

Основою утворення фізичних каналів є поділ частотних каналів на часові інтервали – слоти, які циклічно повторюються. В одному частотному каналі за технологією *TDMA* формується 8 фізичних каналів, які розміщуються у 8 часових вікнах (слотах) у межах *TDMA* кадру (див. рис. 2.5). Загальна кількість фізичних каналів в стандарті *GSM-900* складає: $124 \cdot 8 = 992$ канали. Тривалість часового слота складає 0,577 мс (точно $15/26$ мс), а період повторення – тривалість циклу *TDMA* дорівнює 4,615 мс (точно $120/26$ мс). *Набір (пакет) часових інтервалів, які циклічно повторюються, утворюють фізичний канал для передачі мовної інформації, даних або сигналів керування* (див. рис.10.4).

При з'єднанні базової станції з мобільною станцією передача в обох напрямках відбувається в часових слотах з однаковим номером, але в частотних каналах, які зсунуті між собою на 45 МГц. Передача з рухомої станції проходить із запізненням на час трьох часових слота (1,731 мс). Неодночасна передача і прийом значно полегшує функціонування мобільної станції і спрощує її конструктивно. Оскільки прийом і передача сигналів мобільною станцією можуть виконуватись в різний час, то приймач і передавач підключаються до антени по черзі, що спрощує схемну побудову.

Кожний частотний канал обслуговує 8 фізичних каналів зі швидкістю 22,8 кбіт/с, або 16 каналів із половинною швидкістю 11,4 кбіт/с. Загальна швидкість в радіоканалі на одній несучій складає 270,833 кбіт/с.

Для боротьби з інтерференційними завмираннями, які викликані багатопроблемним розповсюдженням радіохвиль в умовах міста, використовується повільне переключення (скакання) робочих частот (**SFH**) під час сеансу зв'язку зі швидкістю 217 скакань у секунду (рис. 10.1). Крім того, це зменшує співканальні завади, які формують БППС(*BTS*), що працюють на однакових частотних каналах. При цьому використовують доступні робочі канали в межах стільника (як правило, не менше чотирьох) та зберігають постійним дуплексне частотне рознесення 45 МГц.

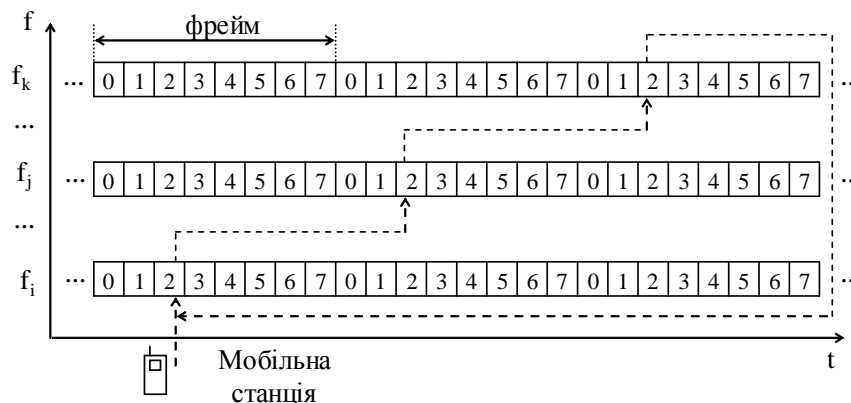


Рис. 10.1. Технологія повільних стрибків по частоті (SFH) в стандарті GSM

Для формування **фізичного каналу** повідомлення та дані, які подані в цифровій формі, групуються і об'єднуються в **логічні канали** двох типів:

- *канали зв'язку (канали трафіку) (TCH – Traffic Channel)* – для передачі розмови або даних;
- *канали керування (CCH - Control Channel)* - для передачі сигналів керування і синхронізації.

10.3. Структура ефірного інтерфейсу

В стандарті *GSM* реалізована складна ієрархічна часова структура цифрового потоку, яка передається по радіоінтерфейсу: **біт – слот – кадр – мультикадр – суперкадр – гіперкадр**.

Часова структура ефірного інтерфейсу системи організовується кадрами, які мають тривалість 4,615 мс. Кожний кадр складається з восьми слотів по 577 мкс (точно 15/26 мс). Інформаційний кадр може бути одним із двох видів - кадр каналу трафіку або кадр каналу керування (рис. 10.2). В обох випадках він має ту саму тривалість і складається з 8 слотів, що мають різну структуру й різний інформаційний зміст.

На рис. 10.2 представлена структура кадру каналу трафіка при передачі мови. Тривалість слоту відповідає 156,25 біт, тобто одному біту відповідає тривалість 3,69 мкс.

Перші 148 біт слоту становлять інформаційний пакет, решта 8,25 біт - захисний інтервал *G* (*Guard period*). З 148 біт пакета на передачу інформації виділяється 116 біт, з них 114 біт - на передачу кодованої інформації *ED* (*Encrypted Data*) і 2 біт - на сховані прапори *S* (*Stealing flag*), що визначають тип переданої інформації (мова або керування), 26 біт займає тренувальна послідовність *TS* (*Training Sequence*), 6 біт, що залишилися утворюють два 3-бітові захисні бланки по краях пакета *T* (*Tail bits* - хвостові біти).

Структура слота для каналів керування наведена на рис. 10.3. При повношвидкісному кодуванні кожний слот кадру відповідає своєму каналу мови. При напівшвидкісному кодуванні слоти, що відповідають тому ж самому каналу мови, передаються через кадр.

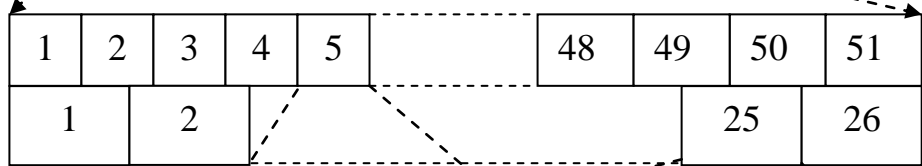
Інформаційні кадри (рис. 10.2) поєднуються в **мультикадри**: 26 кадрів каналу трафіку, утворюють мультикадр каналу трафіку тривалістю 120 мс. При цьому в 24 кадрах передається інформація мови - це кадри з номерами 1...12 і 14...25; у кадрі номер 13 передається інформація низькошвидкісного суміщеного каналу керування (каналу *SACCH*), а кадр 26 залишається порожнім (він зарезервований для передачі другого сегмента інформації каналу *SACCH* при напівшвидкісному кодуванні). Мультикадр каналу керування має тривалість 235 мс і складається з 51 кадру каналу керування.

Мультикадри, у свою чергу, поєднуються в **суперкадри**: один суперкадр складається з 51 мультикадру каналу трафіка або 26 кадрів каналу керування. Тривалість мультикадру в обох випадках становить 6,12 сек., або 1326 кадрів. Нарешті, 2048 суперкадрів утворюють один **гіперкадр**, який має тривалість 3 год. 28 хв. 53,760 сек., або 2715648 кадрів.

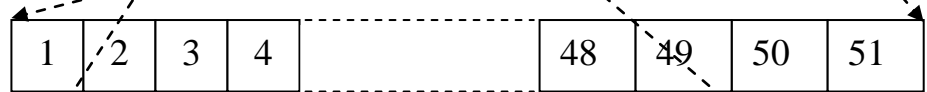
Гіперкадр
(2048 суперкадрів;
2715648 кадрів;
3 год. 28 хв. 53,760 с



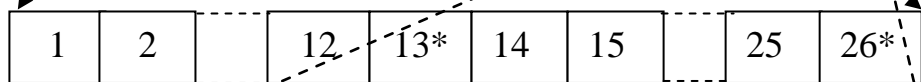
Суперкадр
(51 мультикадр
каналу трафіку;
26 мультикадрів
каналу управління;
1326 кадрів; 6,12 с)



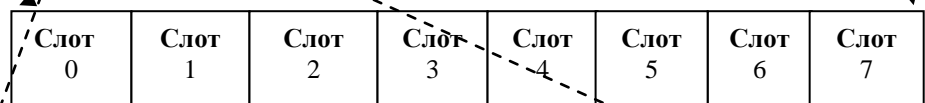
Мультикадр каналу
управління (51 кадр;
235 мс)



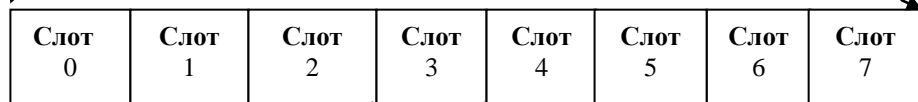
Мультикадр
каналу трафіка
(26 кадрів; 120 мс)



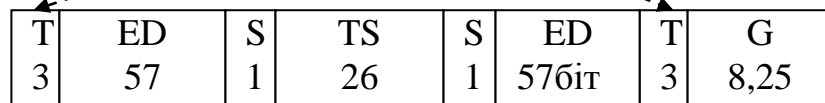
Кадр
каналу управління
(8 слотів; 4,615 мс)



Кадр
каналу трафіка
(8 слотів; 4,615 мс)



Слот
(577 мкс)



Інформаційний (нормальний) пакет
(Normal burst)(148 біт)

Рис. 10.2. Структура ефірного кадра I-інтерфейсу системи GSM:
ED(Encrypted Data) - закодована інформація; TS(Training Sequence) - тренувальна послідовність; T(Tail bits) - захисний бланк; S(Stealing flag) - схований прапор (ознака мова/керування); G(Guard period) - захисний інтервал

Пакет корекції частоти	T 3	Фіксований набір біт 142 (біта)			T 3	G 8,25
Пакет синхронізації	T 3	ED 39	ETS 64	ED 39 (біт)	T 3	G 8,25
Холостий пакет	T 3	Бітова суміш (шум) 142 (біта)			T 3	G 8,25
Пакет доступу	ET 8	TS 41	ED 36	T 3	G 68,25 (біт)	

Рис. 10.3. Варіанти структури слоту каналів керування системи GSM

ED - закодована інформація (*Encrypted Data*);

TS - навчальна послідовність (*Training Sequence*);

ETS - розширена навчальна послідовність (*Extended Training Sequence*);

T - захисний бланк (*Tail bits* - хвостові біти);

ET - розширений захисний бланк (*Extended Tail*);

G - захисний інтервал (*Guard period*).

10.4. Типи логічних каналів

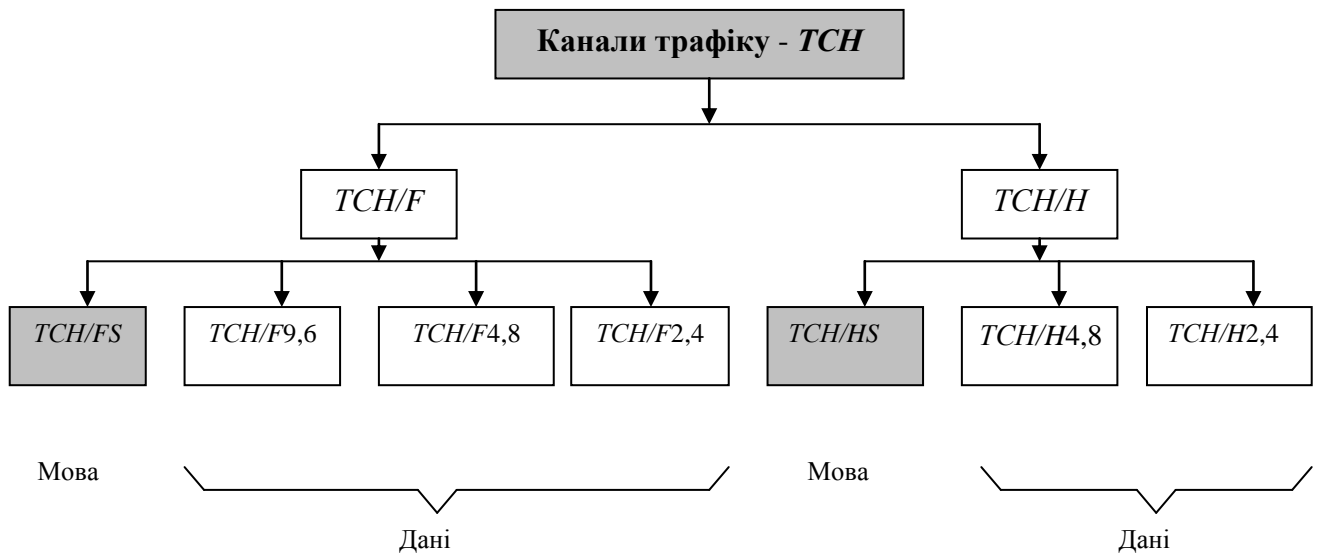
Канал трафіку (*TCH*) забезпечує передачу розмови або даних, а канал керування (*CCH*) забезпечує передачу даних сигналів керування (сигналізації) і синхронізації.

В системі *GSM* використовуються логічні канали трафіку (зв'язку) двох основних видів:

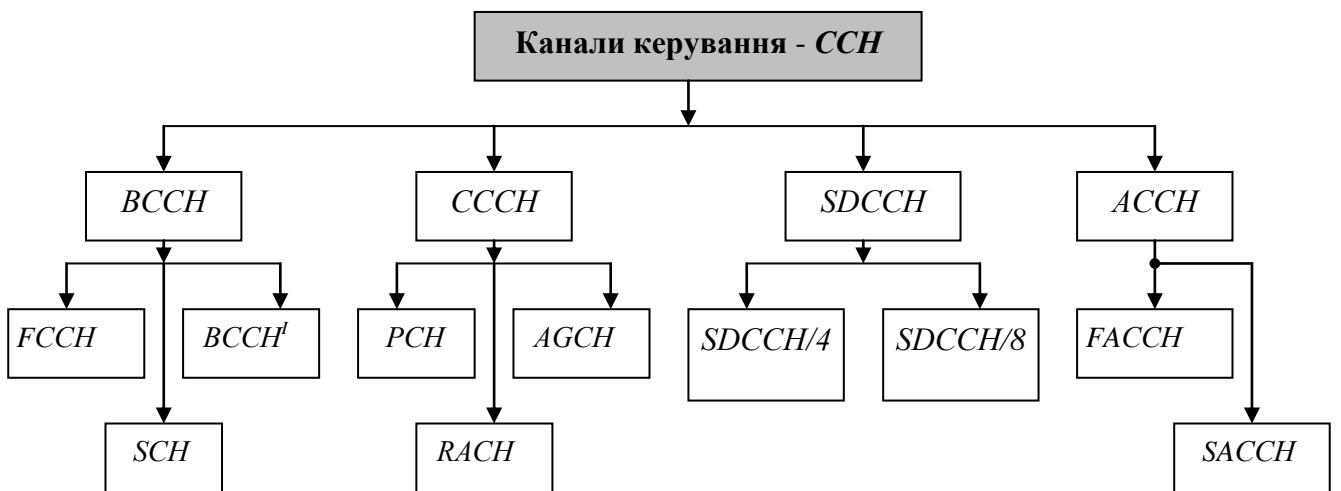
- повношвидкісний канал *TCH/F* (інше позначення - *Vm*) - канал передачі повідомлень з повною швидкістю 22,8 кбіт/с;

- напівшвидкісний канал *TCH/H* (інше позначення - *Lm*) - канал передачі повідомлень з половиною швидкістю 11,4 кбіт/с.

Один фізичний канал забезпечує передачу повідомлень з повною швидкістю або два канали – з половиною швидкістю. Таким чином, кожна пара частотних каналів з шириною смуги 200 кГц обслуговує 8 робочих (фізичних) каналів з повною швидкістю або 16 каналів – з половиною швидкістю.



а)



- BCCH** – Broadcast Control Channel – трансляційні (мовленнєві) канали керування.
- FCCH** – Frequency Correction Channel – канал корекції (підстроювання) частоти носія (БППС → МС)
- SCH** – Synchronization Channel – канал синхронізації (БППС → МС).
- BCCH'** – канал загальної інформації (БППС → МС).
- CCCH** – Common Control Channel – спільний канал керування.
- PCH** - Paging Channel – канал виклику (БППС → МС).
- RACH** – Random Access Channel – канал випадкового доступу (БППС ← МС).
- AGCH** - Access Grant Channel – канал дозволу доступу (БППС → МС).
- SDCCH** – Standalone Dedicated Control Channel – індивідуальний (виділений) канал керування.
- SDCCH/4** – складається з 4 підканалів (БППС ↔ МС).
- SDCCH/8** - складається з 8 підканалів (БППС ↔ МС).
- ACCH** – Associated Control Channel - суміщений канал керування.
- FACCH** – Fast Associated Control Channel – швидкий суміщений канал керування (БППС ↔ МС).
- SACCH** – Slow Associated Control Channel – повільний суміщений канал керування (БППС ↔ МС)

б)

Рис. 10.4. Канали трафіку та керування

Канали трафіку (*TCH*) бувають таких типів (рис. 10.4а):

- канали для передачі мови з:

- повною швидкістю *TCH/FS* (*FS- Full Speech*, коли мова кодується цифровим потоком зі швидкістю 13 кбіт/сек.);

- половинною швидкістю *TCH/HS* (*HS- Half Speech*, коли мова кодується цифровим потоком зі швидкістю 6,5 кбіт/сек.);

- канали передачі даних з:

- повною швидкістю 9,6 кбіт/с (*TCH/F 9,6*); 4,8 кбіт/с (*TCH/F 4,8*); 2,4 кбіт/с (*TCH/F 2,4*);

- половинною швидкістю 4,8 кбіт/с (*TCH/H 4,8*); 2,4 кбіт/с (*TCH/H 2,4*).

В стандарті *GSM* розрізняють чотири види каналів керування (*CCH*) (див. рис. 10.4б):

- трансляційні (мовленнєві) канали керування ***BCCH*** (*Broadcast Control Channel*);

- спільні канали керування ***CCCH*** (*Common Control Channels*);

- індивідуальні (виділені) канали керування ***SDCCH*** (*Stand-alone Dedicated Control Channels*);

- суміщені канали керування ***ACCH*** (*Associated Control Channels*).

Трансляційні канали передачі сигналів керування ***BCCH*** використовуються для передачі сигналізаційної інформації та синхронізації тільки в напрямку від БППС на всі МС даної клітини в мовленнєвому режимі, тобто без адресації. Ця інформація необхідна мобільним станціям і використовується на стадії з'єднання.

Кожний із названих каналів керування, в свою чергу, складається з окремих трьох чи двох типів каналів передачі (рис. 10.4б).

Трансляційні канали ***BCCH*** поділяються на:

- канал корекції (підстроювання) частоти ***FCCH*** (*Frequency Correction Channel*), який використовується для підстроювання частоти МС на частоту БППС. По цьому каналу передається немодульована інформація з фіксованим частотним зміщенням відносно мінімального номінального значення частоти каналу зв'язку;

- канал синхронізації ***SCH*** (*Synchronization Channel*), по якому на МС передається інформація про кадрову (часову) синхронізацію;

- канал загальної інформації ***BCCH'***, який не має окремої назви, об'єднується з другими каналами та забезпечує передачу ідентифікаційних параметрів системи (оператора), а саме: код зони викликів *LAC*, ідентифікатор оператора *MNC*, номери каналів, які використовуються в сусідніх стільниках та інші параметри доступу до системи. Ця інформація передається через регулярні інтервали часу кожною БППС.

Спільні канали керування ***CCCH*** бувають трьох типів:

- канал виклику ***PCH*** (*Paging Channel*), який використовується для виклику МС в напрямку від БППС до МС;

- канал випадкового доступу *RACH* (*Random Access Channel*) - для запиту з боку МС на БППС про призначення індивідуального (виділеного) каналу керування при встановленні з'єднання;

- канал дозволення доступу *AGCH* (*Access Grant Channel*) – у відповідь на запит МС для виділення індивідуального каналу керування *SDCCH*. Використовується тільки в напрямку від базової станції до мобільної станції.

При передачі інформації по спільним каналам керування прийом інформації не супроводжується підтвердженням.

Індивідуальні (виділені) канали керування SDCCH використовуються в двох напрямках між БС і МС і мають такі типи каналів:

- індивідуальний канал керування, що складається з чотирьох підканалів (*SDCCH/4*);

- індивідуальний канал керування – з 8 підканалів (*SDCCH/8*).

Ці канали призначені для сигналізації у процесі встановлення з'єднання до призначення користувачу каналу трафіку (автентифікація, реєстрація та ін.). По них також забезпечується запит мобільної станції про потрібний вид обслуговування, контроль вірної відповіді базової станції і виділення вільного каналу, якщо це можливо.

В двох напрямках між БППС і МС також використовуються суміщені канали керування. По напрямку “вниз” – вони передають команди керування з БППС, по напрямку „вверх”--інформацію про статус мобільної станції.

Суміщених каналів ACCH використовуються два види:

- *FACCH* (*Fast Associated Control Channel*) – швидкий суміщений канал керування, який використовується тоді, коли є необхідний швидкий обмін сигналізаційною інформацією. Наприклад, для передачі команд перемикавання каналів при зміні стільника мобільною станцією, тобто при естафетній передачі станції. Канал завжди зв'язаний з мовним каналом;

SACCH (*Slow Associated Control Channel*) – повільний суміщений канал керування, який використовується для передачі допоміжної системної інформації з низьким пріоритетом. Наприклад, в напрямку “вниз” - для передачі команди на установлення вихідного рівня потужності передавача МС та для регулювання часового випередження. В напрямку “вверх” МС надсилає дані про вимірювання потужності власної та сусідніх БППС для процедури перемикавання.

Суміщені канали керування (*FACCH* та *SACCH*) завжди об'єднуються разом із каналами трафіку або з індивідуальними каналами керування.

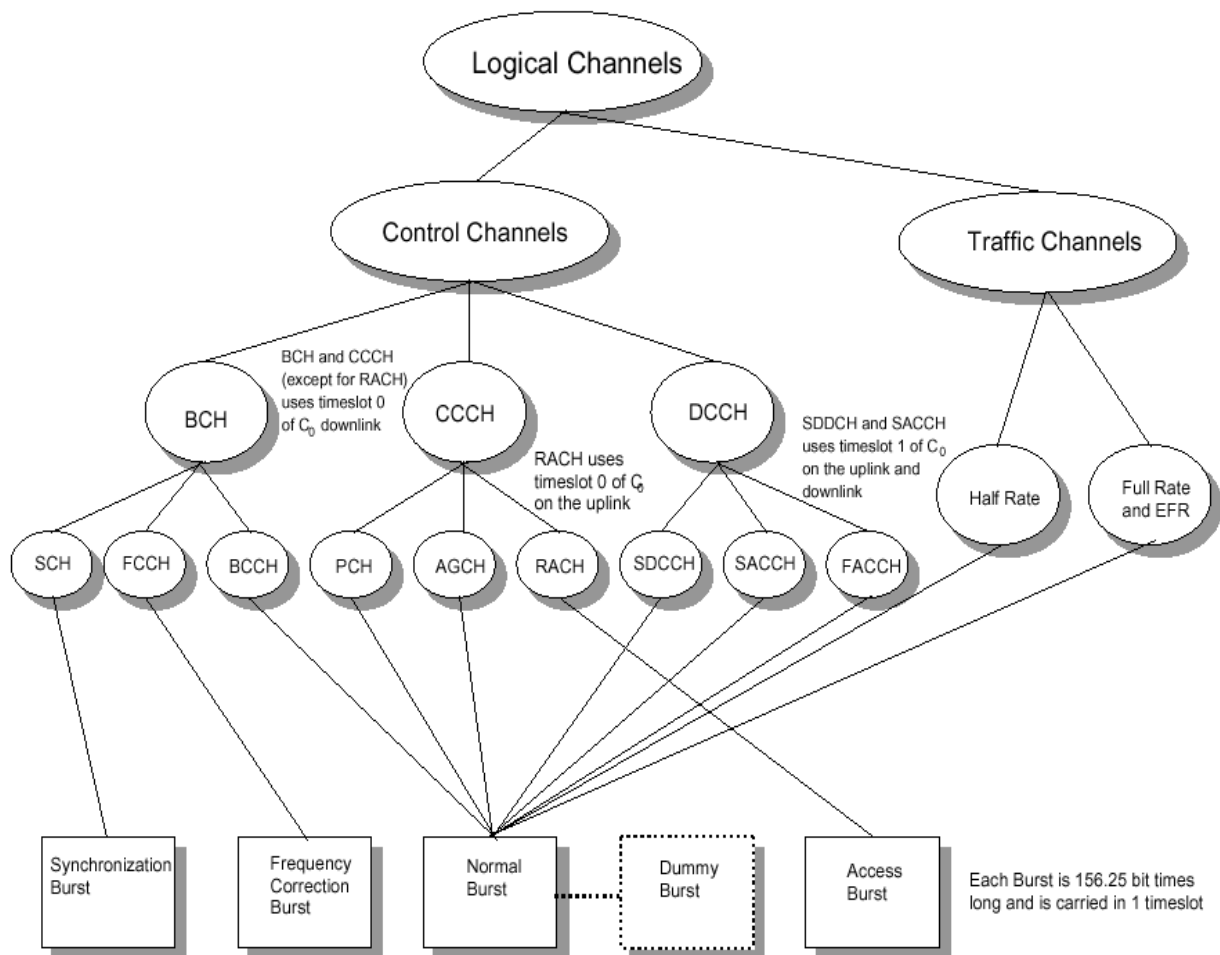


Рис.10.5. Логічні канали та пакети

Висновки:

1. *Логічні канали*, які забезпечують передачу інформації зі швидкістю 22,8 кбіт/с, можуть бути розділені на дві групи: *канал трафіку (зв'язку) ТСН (Traffic Channel)* і *канали керування ССН (Control Channel)*. Канали трафіку забезпечують передачу закодованої розмови, а канали керування забезпечують передачу даних сигналів керування (сигналізації) і синхронізації.
2. *Трансляційні канали керування* забезпечують передачу системної інформації (наприклад, ідентифікацію БППС) і синхронізацію, що постійно передається базовою станцією.
3. *Спільні канали керування* забезпечують опитування і доступ до системи мобільних станцій.
4. *Індивідуальні канали керування* виділяються для використання окремим мобільним станціям.
5. *Суміщенні канали керування* використовуються в фазі установлення зв'язку для передачі результатів вимірювання потужності сигналу від мобільної станції, а також для сигналізації в момент перемикання зв'язку (при естафетній передачі).

10.5. Комбінації логічних каналів в фізичних каналах.

Нульовий часовий інтервал (таймслот) на нульовій несучій частоті в стільнику завжди резервується для сигналізації (рис.10.6). Як правило, один канал керування приходить на два частотні канали.

		Time slot							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Carrier Frequency	0	B,C	D	T	T	T	T	T	T
	1	T	T	T	T	T	T	T	T
	2	T	T	T	T	T	T	T	T
	3	D	T	T	T	T	T	T	T

Legend:
 B: BCCH
 C: CCCH
 D: DCCH
 T: TCH

Рис.10.6.Варіант розміщення логічних каналів у фізичних

Логічні канали розташовуються в фізичних каналах за допомогою однієї із семи комбінацій (таблиця 10.2). Кожна комбінація логічних каналів потребує одного фізичного каналу ємністю одного частотно-часового інтервалу, що циклічно повторюється через кожні 4,615 мс. Кожний з восьми фізичних каналів, що знаходяться на тій самій несучій частоті, заповнюється однією із комбінацій, представлених в таблиці 10.2.

На рис. 10.7 пояснено значення спрощеного запису, який буде застосований для представлення комбінації логічних каналів, описаних в таблиці 10.2. Фізичний канал № 3 в 26-цикловому мультициклі організовується за допомогою 26 часових інтервалів № 3, що знаходяться в 26 циклах *TDMA* даного мультициклу (верхня частина рисунку 10.7). У спрощеному записі видно тільки 26 циклів *TDMA* (нижня частина рис. 10.7). Потрібно пам'ятати, що в нижній частині рисунку показано не весь мультицикл, а тільки один фізичний канал, а отже тільки 1/8 частину мультициклу.

Комбінації логічних каналів трафіку

На рис.10.8 представлена структура 26-циклового мультициклу, призначеного для передачі сигналів мови. Кожне поле, позначене на рис.10.8 літерою, відповідає *i* - тому часовому інтервалу в кожному з циклів *TDMA*. На рисунку показано фізичний канал тільки в одному напрямку, тоді як всі логічні канали, які зображені тут, є двонаправленими і організація фізичного каналу в другому напрямку ідентична.

Комбінація I: *TCH/FS+FACCH/FS+SACCH/FS* (рис. 10.8a). Ця комбінація призначена для передачі мовних сигналів, які містяться в логічному каналі трафіку типу *full-rate (TCH/FS)*. Двадцять чотири поля

цього каналу, які позначені літерами T , призначені для трансмісії закодованих сигналів мови (логічний канал TCH/FS), поле S призначене для повільного суміщеного каналу керування $SACCH$, а поле „-“ не використовується. Цикл на рис. 10.8 повторюється 8,33 (120мс) рази на секунду, отже одному мовному каналу відповідає $8,33 \cdot 24 = 200$ полів/с. В кожному полі передається один основний пакет. З алгоритму кодування мови випливає, що для передачі 20-мілісекундного циклу сигналу мови потрібно чотири пакети, отже ємність одного фізичного каналу (216,67 пакетів/с, з них для каналів трафіку TCH/FS – 200 пакетів мови/с), достатня для передачі в реальному часі сигналу мови разом з сигналізаційною інформацією, що міститься в каналі $SACCH$. Швидкий суміщений канал керування $FACCH$ має найвищий пріоритет і по потребі замінює поля T , передбачені для трансмісії мовних пакетів з каналу TCH/FS .

Комбінації II і III (рис. 10.8б). Вони призначені для передачі мовних каналів тилу *half-rate* (TCH/HS). У випадку комбінації III парні поля на рисунку (позначені літерами “ T ”) призначені для першого мовного каналу, а непарні поля (позначені літерами “ t ”) призначені для другого мовного каналу. Кожний з каналів має також свій повільний суміщений канал керування $SACCH$, позначений, відповідно, літерами “ S ” і “ s ” на рис. 10.8б. Отже, кожному з мовних каналів припадає, в цьому випадку, 100 пакетів мови/с (тобто 100 полів/с). Комбінація II відрізняється від комбінації III тільки тим, що в комбінації використовується тільки через одне поле, тому що в фізичному каналі передається тільки один логічний канал TCH/HS . Роль пакетів $FACCH$ в трансмісії така сама, як і у випадку комбінації I.

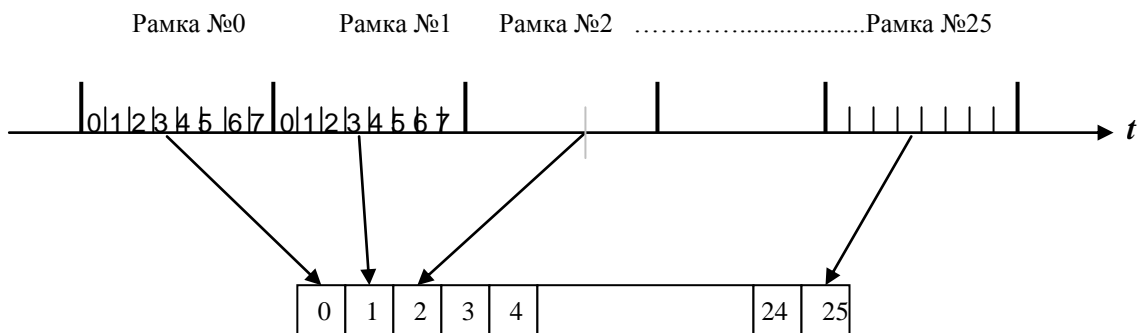


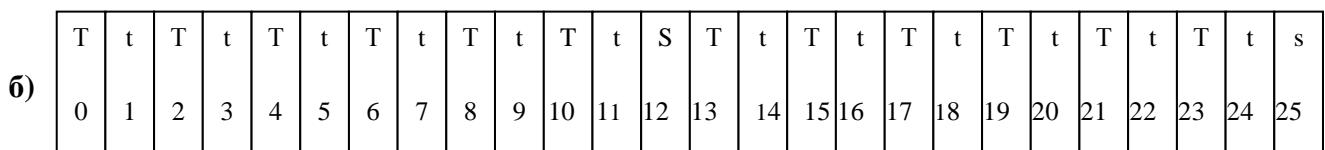
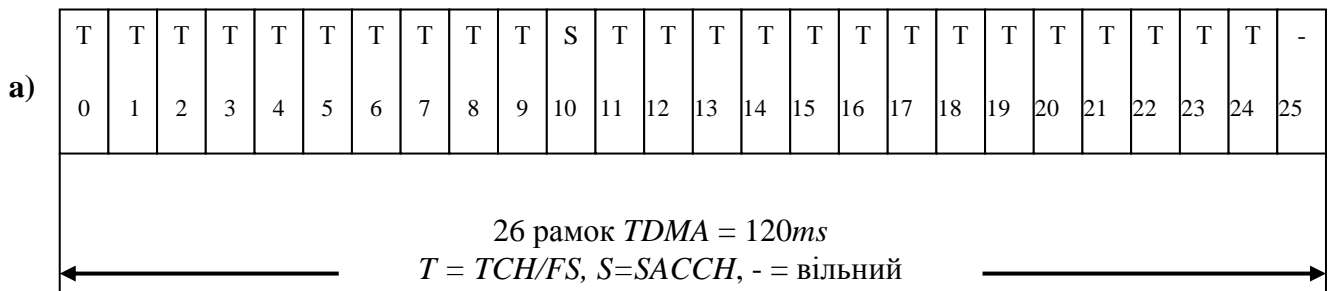
Рис. 10.7. Утворення фізичного каналу в 26-рамковій суперрамці.

Розміщення логічних каналів у фізичних каналах

Таблиця 10.2.

Номер комбінації	Організація логічних каналів	Примітки
I	$TCH/FS + FACCH/FS + SACCH/FS$	Основна комбінація для передачі сигналів мови
II	$TCH/HS(0,1)^* + FACCH/HS(0,1) + SACCH/HS(0,1)$	Необхідно використовувати кодування мови типу <i>half-rate</i>
III	$TCH/HS(0) + FACCH/HS(0) + SACCH/HS(0) + TCH/HS(1) + FACCH/HS(1) + SACCH/HS(1)$	Необхідно використовувати кодування мови типу <i>half-rate</i>
IV	$FCCH + SCH + CCCH + BCCH + SDCCH/4 + SACCH/4$	Для взаємодії з комбінацією VII
V	$FCCH + SCH + CCCH + BCCH + SDCCH/4 + SACCH/4$	Замінює комбінації IV і VII
VI	$CCCH + BCCH$	Розширює комбінацію IV
VII	$SDCCH/8 + SACCH/8$	Для взаємодії з комбінацією IV

Примітка: * - „0” та „1” - номери мовних каналів.



$$T = TCH/HS0, S = SACCH0, t = TCH/HS1, s = SACCH1$$

Рис. 10.8. Організація фізичного каналу, призначеного для передачі логічних каналів трафіку:

- а) один повношвидкісний канал типу *full-rate*;
 б) два напівшвидкісних канали типу *half-rate*

Комбінації каналів керування

Комбінації IV, V, VI, і VII в таблиці 10.2 містять виключно логічні канали керування. Обговорюючи ці комбінації, потрібно окремо описати

напрямок “вниз” і напрямом “вверх”, тому що сигналізаційні канали для окремих напрямків часто організовують по-іншому.

Комбінація IV: $FCCH+SCH+CCCH+BCCH$. В каналі “вниз” розташовані трансляційні канали $FCCH$, SCH , $BCCH$ та спільні канали керування $CCCH$, причому останні можуть бути довільною комбінацією викличних каналів PCH та каналів виділення лінії $AGCH$. Поля, які відповідають трансляційним каналам, завжди містять корисну інформацію. Поля $CCCH$ використовуються, звичайно, тільки частково в залежності від кількості викликів. Викличні канали PCH беруть участь у підготовчій фазі до встановлення з'єднання, що надходить, а канали $AGCH$ – у встановленні вихідних з'єднань від абонента системи GSM . Якщо не всі поля $CCCH$ використовуються, то в цих полях передаються замінні пакети. Комбінація IV передається завжди в нульовому інтервалі на одній із частот, що використовується даною базовою станцією. Ця частота використовується як спеціальна частота для сусідніх стільників (англ. *beacon frequency*). На цій частоті в нульовому часовому інтервалі мобільні станції, які перебувають в сусідніх стільниках, проводять постійні вимірювання потужності сигналу. В комбінації IV, канал “вгору” призначений для передачі мобільною станцією несинхронізованих між собою випадкових вимог доступу до системи (канал $RACH$). Решта інтервалів в той час не використовується. Комбінація IV призначена для використання разом із, взаємодіючою з нею в іншому інтервалі, комбінацією VI, в якій знаходиться решта сигналізаційних каналів.

Комбінація IV використовується тоді, коли в стільнику є кілька несучих частот. Такі стільники здатні обслуговувати відносно великі навантаження. В стільнику, який обслуговує невелике навантаження, використовується комбінація V.

Комбінація V: $FCCH+SCH+CCCH+BCCH+SDCCH/4+SACCH/4$. Запис $SDCCH/4$ і $SACCH/4$ позначає можливість використання в цій комбінації чотирьох різних індивідуальних каналів керування $SDCCH$ із чотирма повільними суміщеними каналами керування $SACCH$. Таким чином одержують чотири рівноправні сигналізаційні канали в одному фізичному каналі. Комбінація V передбачена для використання в малих базових станціях, які використовують одну або дві несучі частоти. Вона надає повний комплект потрібних сигналізаційних каналів: трансляційні, спільні, індивідуальні і суміщені канали. Комбінація V завжди передається в нульовому часовому інтервалі і взаємно виключається з комбінацією IV. Кожний із суміщених каналів $SACCH$ передається кожним другим мультициклом. Швидкість каналу $SACCH$ невелика і становить тільки приблизно 2 пакети/с.

Комбінація VI: $CCCH+BCCH$. У випадку, коли базова станція використовує велику кількість несучих частот, що вказує на велике навантаження в сигналізаційних каналах, то кількість каналів $CCCH$ в комбінації IV може виявитись занадто малою. Комбінація VI збільшує кількість спільних сигналізаційних каналів $CCCH$. На відміну від

комбінації IV, розташованої завжди в нульовому часовому інтервалі, комбінація VI може знаходитися в інтервалах: другому, четвертому або шостому. Коли діє ця комбінація, то канали *FCCH* і *SCH* вже не передаються.

Комбінація VII: *SDCCH/8+SACCH/8*. Вона призначена для взаємодії з комбінацією IV, в якій немає місця на передачу сигналізаційної інформації в фазі встановлення з'єднання (наприклад, реєстрація абонента або його ідентифікація). Для цієї мети служать індивідуальні канали *SDCCH*. Запис *SDCCH/8* і *SACCH/8* означає можливість використання в цій комбінації восьми різних каналів *SDCCH* з вісьмома повільними суміщеними каналами *SACCH*. В цей спосіб одержують вісім логічних сигналізаційних каналів в одному фізичному каналі.

11. Обладнання підсистеми базових станцій (BSS)

Спрощена структурна схема ансамблю базових станцій показана на рис. 11.1. Архітектура ансамблю базових станцій дворівнева. З боку комутаційної станції *MSC* знаходяться блоки управління базовими станціями *BSC*, а після них – базові станції *BTS*. Базові станції з'єднуються через радіоканали з рухомими станціями (*MS*). Додатковим модулем, який входить до складу ансамблю базових станцій, є модуль транскодера *TCE* (на деяких схемах позначається як *TRAU* – *Transcoding and Rate Adaption Unit* – блок транскодера та адаптації швидкості потоку).

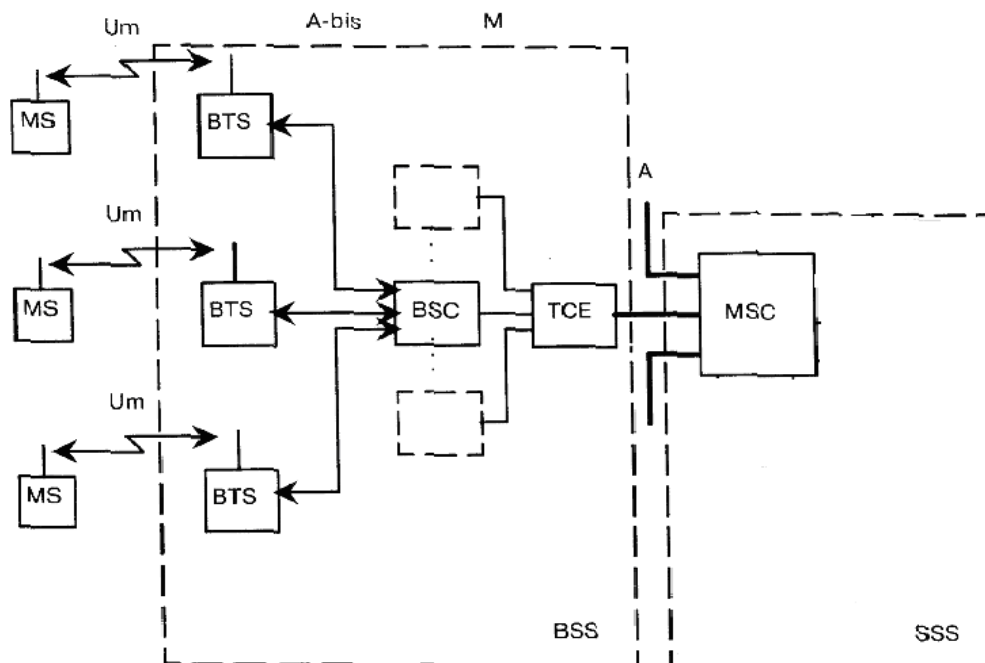


Рис. 11.1. Блок-схема ансамблю базових станцій

Ансамбль базових станцій поділено на частини – керуючу (блоки керування *BSC*) і передавальну (базові станції *BTS*). З комутаційної станції *MSC* до керуючої частини перенесено ряд комутаційних функцій і функцій керування, пов'язаних з обслуговуванням радіоінтерфейсу. Один блок управління *BSC* керує роботою кількох або кількох десятків базових станцій.

Стик ансамблю базових станцій з комутаційною станцією *MSC* стандартизовано. Він носить назву *A*-інтерфейс. В зв'язку з тим, що комутаційні станції системи *GSM*, як передбачалося, будуть наступним кроком після *ISDN*, на трансмісійному рівні обидва типи комутаційних станцій повинні стикуватися. Отже, бінарний канал в *A*-інтерфейсі – це стандартний канал *KM* зі швидкістю 2048 кбіт/с, згідно вимог *CCITT G.703*. Мультиплексування (організація каналу) відбувається з використанням періоду в 125 с. В групі є 32 канали, швидкість кожного

становить 64 кбіт/с. Існування стандартного інтерфейсу *A* дає можливість застосувати в тій самій системі *GSM* комутаційні станції від різних виробників. Сигналізацію організують порівнево, згідно з моделлю *OSI*, базуючись на системі сигналізації *SS7*. Часові інтервали в каналі 2048 кбіт з *A*-інтерфейсу можуть використовуватися як мовні канали, так і як сигналізаційні. Спільний сигналізаційний канал створюється на основі одного або кількох каналних інтервалів в каналі 2048 кбіт/с.

A-інтерфейс – це посередник між комутаційно-мережевою частиною та ансамблем базових станцій. В системі *GSM* стандартизований також внутрішній стик ансамблю базових станцій. Блок керування базовими станціями *BSC* взаємодіє з базовими станціями *BTS* через інтерфейс *A-bis*. Подібно, як і в системі *IKM*, використано організацію бінарного каналу зі швидкістю передачі 2048 кбіт/с.

11.1. Базова приймально-передавальна станція (*BTS*)

Функції БППС

Базова станція взаємодіє, з одного боку через радіоінтерфейс з мобільними станціями, а з другого боку, через інтерфейс *A-bis* – з блоком керування базовими станціями. Найважливіші функції базових станцій такі:

- реєстрація викликів (наказ виділення окремого сигналізаційного каналу) від мобільних станцій;
- функції, що пов'язані з перетворенням сигналу в передавальному та приймальному напрямках: кодування і декодування мови, кодування і декодування каналу, перемежування, модуляція і демодуляція; та в напрямку передачі: перенесення сигналу до радіочастоти, підсилення і подача радіосигналів на антену; а в приймальному напрямку: фільтрація сигналів, розподіл і перенесення до основного спектру;
- шифрування і дешифрування сигналів передачі в радіоканалі;
- передача результатів власних вимірювань та результатів, отриманих від мобільних станцій, до блоку керування *BSC*;
- виконання скакання по частотах;
- забезпечення синхронізації між мобільною станцією і базовою.

Базова станція може працювати на одній або кількох радіочастотах (максимально до 16). Для кожної частоти повинен бути власний передавач і приймач. На рис. 11.2 представлено основні функціональні блоки станції, яка працює на чотирьох частотах. Подібно, як в описаній раніше функціональній схемі мобільної станції, в базовій станції можна виділити цифрову і аналогову частини. Завданням цифрової частини є, перш за все, перетворення інформаційних сигналів (мови або даних) в обох напрямках. В цій частині виконується також скакання по частотах. В аналоговій частині базової станції знаходяться чотири передавачі *TX* і

чотири приймачі *RX*, по одному для кожної частоти, та групоутворювач і модуль *RXFE*. Кожний передавач *TX* містить цифрово-аналоговий конвертор *C/A*, модуль *GMSK*, конвертор сигналу до радіочастоти та підсилувач потужності. Наступним блоком є блок спряження (групоутворювач), який дозволяє передавати кілька радіосигналів за допомогою однієї антени (його будова і можливості будуть описані далі). Передавальна антена часто виконується як окремий елемент відносно приймальної антени. З приймальної сторони знаходиться приймальна антена, а потім аналоговий модуль початкової обробки високочастотних сигналів *RXFE* (англ. *Receiver Front-End*). В цьому модулі міститься розгалужувач, смугові фільтри та підсилувачі з низьким рівнем шумів. В блоках приймачів *RX* відбувається перетворення частоти до основної смуги та аналого-цифрова конверсія сигналів прийому. Демодуляція проходить в модулі цифрового перетворення сигналів, спільно з процедурою корекції радіоканалу, але різні виробники мають свободу відносно власних рішень.

Якщо розглянути типове обладнання стійки базової станції, то цифрова частина займає тільки невелику частину стійки. Цифрові блоки через їх невелику вагу розміщені у верхній частині стійки. Головну частину займають чотири передавально-приймальні модулі (для чотирьохчастотної базової станції), кожний з яких має вентилятор, що покращує тепловий обмін з оточуючим середовищем. В середній частині стійки розташовані блоки початкової обробки радіосигналу та групоутворюючі блоки. Якщо стійка розташована в приміщенні АТС, то може користуватися блоками живлення, спільними для багатьох пристроїв. В іншому випадку біля стійок базової станції монтується окремий блок живлення. Блокова будова базової станції дозволяє гнучку розбудову. Збільшення кількості частот базової станції відбувається доповненням наступних стійок.

Одним із елементів базової станції, який заслуговує на додаткову увагу, є блок групоутворювача (англ. *combiner*). Цей блок, який дозволяє об'єднати кілька вихідних сигналів з кількох передавачів на вході антени, будується на основі резонансних схем (англ. *cavity combiner*), які однак мають відносно великі зовнішні розміри. При кожній зміні групи частот, що присвоюються даній базовій станції, такі схеми потребують часто ручного підстроювання. Групоутворюючі блоки працюють на резонансному принципі, що приводить до втрат потужності приблизно 5 *dB* для кількох передавачів.

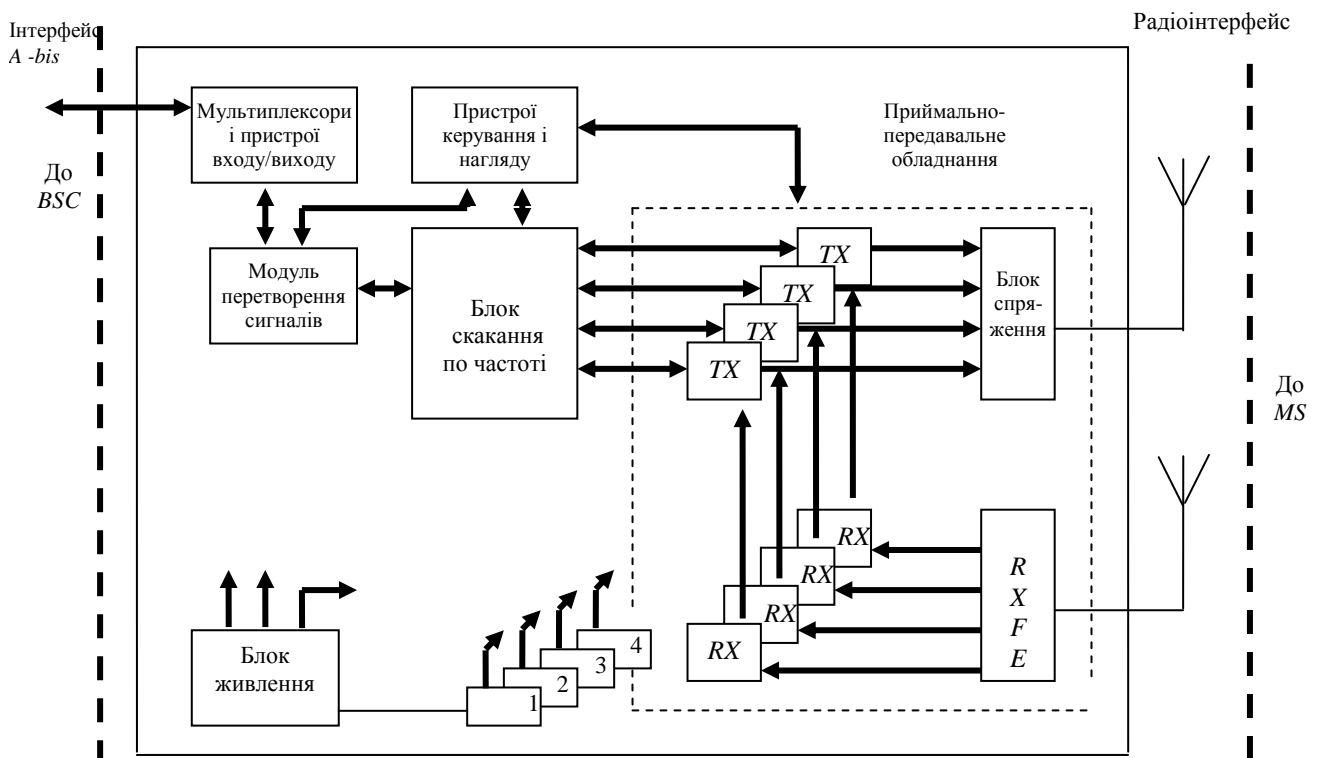


Рис. 11.2. Функціональна схема базової станції

Іншим варіантом побудови групоутворювача є гібридні схеми (англ. *hybrid combiners*), що виконують пасивну комбінацію сигналів передавача. Їх перевага – це малі розміри і широка смуга. Вони не вимагають підстроювання, можуть налаштовуватись під зміни в конфігурації мережі і створюють сприятливі умови для процедури скакання по частотах. Недоліком гібридних схем є великі втрати по потужності і мала селективність. Гібридні групоутворювачі мають втрати для кількох передавачів приблизно 7 dB . Максимальна вихідна потужність базової станції в системі *GSM* визначається відносно входу блоку групоутворення. Отже, якщо прийняти, що втрати в схемі групоутворювача рівні 6 dB , то наприклад, у випадку базової станції третього класу в системі *GSM 900* (максимальна потужність 80 Вт) потужність сигналу на виході антени становить тільки 20 Вт .

Електричні параметри БППС

Подібно, як у випадку мобільної станції, стандарт *GSM* приділяє багато уваги вимогам щодо параметрів сигналів, як корисних, так і некорисних, що передаються базовою станцією в радіоканал:

- **КЛАСИ ПОТУЖНОСТІ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ.** Максимальна потужність передавача базової станції є важливим параметром системи, який характеризує максимально допустиму відстань від мобільної станції до базової, тобто розміри комірки. В таблиці 11.1 показано основні класи потужності базових станцій, які об'єднані в стандарті *GSM* для систем *GSM-900* та *DCS-1800*. В наступні роки впровадження систем *GSM* у світі щоразу більшого значення набирають малостільникові системи, які

раніше застосовувались тільки в безпроводовій телефонії. У зв'язку з цим представлені величини максимальної потужності базових станцій також для мікростільників (таблиця 11.2).

- РЕГУЛЮВАННЯ ВИПРОМІНЮВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ. З метою обмеження рівня інтерференції в системі *GSM* застосовано механізм регулювання потужності. В міру наближення мобільної станції до базової, базова станція, подібно до мобільної, на вимогу блоку керування *BSC* змінює потужність свого передавача від максимальної величини для свого класу до рівня 13 dBm з кроком 2 dB . Подібно до мобільних станцій, побічним ефектом регулювання потужності є небажане випромінювання в сусідніх радіоканалах на частотах вище 400 кГц до сигналу несучої. Максимально допустимий рівень небажаного сигналу, який є результатом регулювання потужності базової станції, становить -103 dBm в смузі прийому $890\text{--}915\text{ МГц}$ для всіх класів потужності базових станцій.

- НЕБАЖАНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОЗА СМУГОЮ. В стандарті *GSM* зазначено, що рівень потужності небажаного сигналу поза смугою системи *GSM*, який випромінює базова станція, що працює в передавальному режимі, не може бути вищим -36 dBm в діапазоні частот від 9 кГц до 1 ГГц . Це означає, що для базової станції першого класу рівень потужності небажаного сигналу повинен бути на 91 dB нижчим від максимального рівня потужності з таблиці 11.1. В діапазоні від 1 ГГц до $12,75\text{ ГГц}$ максимальна величина небажаного випромінювання становить -30 dBm . Жорсткіші вимоги стосуються допустимих рівнів завад для базових станцій і мобільних, що працюють в режимі прийому. Рівень завад не повинен перевищувати -57 dBm в смузі від 9 кГц до 1 ГГц і -47 dBm в смузі від 1 ГГц до $12,75\text{ ГГц}$.

- СТАБІЛЬНІСТЬ ЧАСТОТИ. Частота базових станцій служить еталоном для мобільних станцій. Тому в передавачах базових станцій використовуються дуже точні і стабільні генератори частот. Відносна нестабільність частоти базових станцій повинна становити не гірше $5 \cdot 10^{-8}$.

- ТОЧНІСТЬ МОДУЛЯЦІЇ І ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН. Точність модуляції і динамічний діапазон базових станцій повинні бути такі самі, як і в мобільних станціях. Величина максимального відхилення несучої частоти становить $(\pm)90\text{ Гц}$, а середньоквадратична величина шуму не повинна перевищувати 5% . Мінімальний динамічний діапазон базових станцій становить 92 dB ; приймач базової станції може приймати сигнали мобільних станцій в діапазоні від -10 dBm до -104 dBm .

11.2. Контролер базових станцій (*BSC*).

Між комутаційно-мережевою частиною системи і базовими станціями знаходяться блоки керування базовими станціями – контролери *BSC*. Вони виконують роль, пов'язану, перш за все, з керуванням обслугою

радіоканалів в окремих комірках, мають власне комутаційне поле, займаються також кабельними лініями до базових станцій.

НАЙВАЖЛИВІШІ ФУНКЦІЇ БЛОКІВ КЕРУВАННЯ БАЗОВИМИ СТАНЦІЯМИ:

- конфігурування і керування мовними та сигналізаційними радіоканалами підлеглих йому базових станцій;
- керування скакуванням по частотах;
- керування процедурою шифрування радіопередачі;
- виклик мобільних станцій;
- керування потужністю підлеглих йому базових та мобільних станцій;
- керування перемиканням каналів;
- контроль ймовірності помилок в незайнятих радіоканалах;
- контроль ймовірності помилок і рівня потужності прийнятих сигналів базових станцій та мобільних в зайнятих радіоканалах;
- комутація з'єднання з метою концентрації руху на лініях до комутаційної станції *MSC*;
- утримання і нагляд за з'єднанням між блоками керування і базовими станціями.

Спрощена функціональна схема блоку керування базовими станціями представлена на рис. 11.3. Частина комутаційних функцій була перенесена з комутаційної станції *MSC* на комутаційне поле блоку керування, що привело до зменшення кількості центральних станцій в системі та зниження коштів передачі в стаціонарній частині *GSM* (*BSC* як концентратор). Плата сигналізації блоку керування відповідає за виконання сигналізаційних протоколів в інтерфейсах *A* та *A-bis*. Блок керування наглядає за встановленням з'єднань та роз'єднанням на комутаційному полі та керує підлеглими блоку керування радіозасобами. Блок експлуатації та обслуговування аналізує і зберігає інформацію про помилки в роботі підлеглої їй системі та генерує сигнали тривоги. Через стик *X.25* блок керування з'єднаний з центром експлуатації та обслуговування системи *GSM*.

Деякі виробники не виключають також в недалекому майбутньому можливості об'єднання блоків управління *BSC* і комутаційних станцій *MSC*. В разі потреби, розширення функцій блоку керування до функцій повної комутаційної станції *MSC* (напр., у випадку, коли кількість абонентів, що обслуговуються даним блоком керування значно зростає) вимагатиме тільки зміни програмного забезпечення.

Блоки керування базовими станціями часто встановлюються в системі як самостійні пристрої, але можуть бути також інтегровані з обладнанням базових станцій або на іншому кінці трансмісійної ланки, з обладнанням станції *MSC*, все ж залишаючись функціонально частиною ансамблю базових станцій.

Зі сторони нижчих рівнів системи *GSM* (базових і мобільних станцій) – блоки керування з'єднані стаціонарними лініями з базовими станціями

(рис. 11.1). Представлена на рис. 11.1 зіркова структура з'єднань, в якій кожна базова станція *BTS* з'єднана індивідуальною лінією з блоком *BSC*, не є єдино можливою. Використовують також інші конфігурації. З економічної сторони можна застосувати послідовне з'єднання "n" базових станцій або послідовні з'єднання з петлею. В останньому випадку правильна робота всіх базових станцій можлива навіть тоді, коли одне з'єднання буде обірване. Можливість виконання з'єднань від блока керування базових станцій до базових станцій трьома способами міститься в описі інтерфейсу *A-bis* стандарту *GSM*.

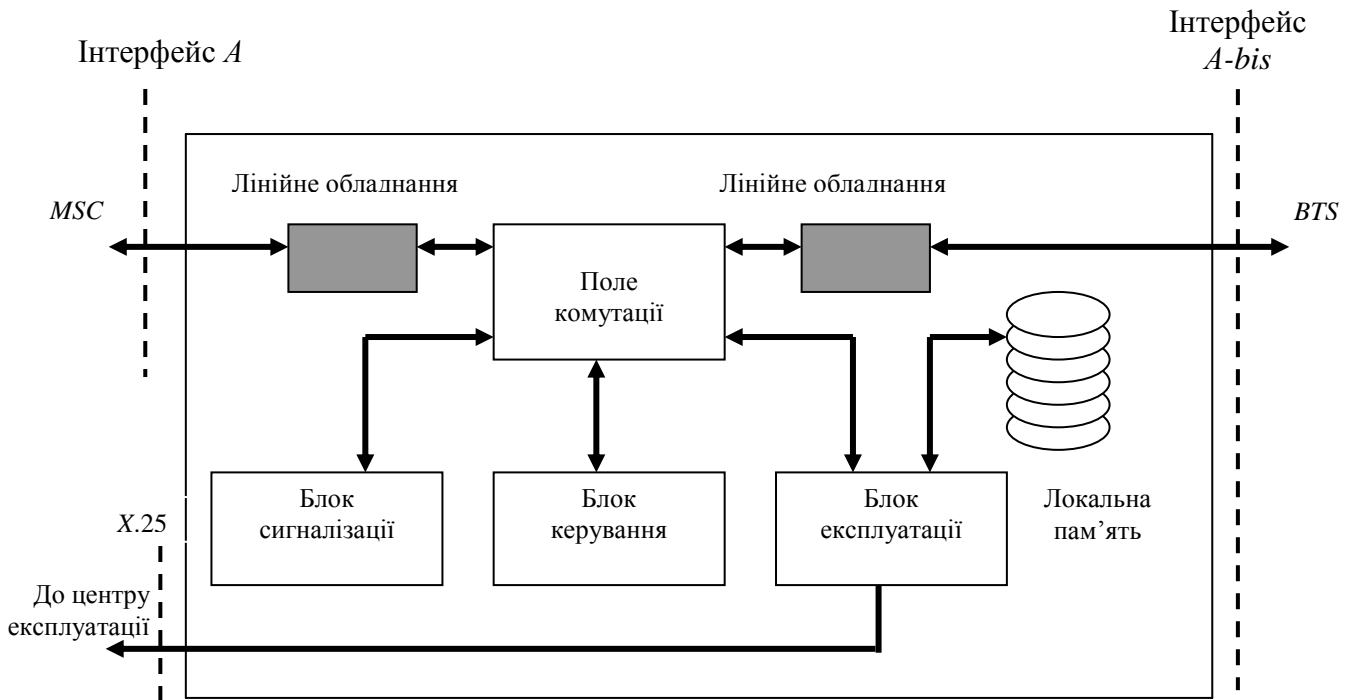


Рис. 11.3. Спрощена блок-схема контролера БПС (*BSC*).

Основні класи потужностей базових станцій в системах *GSM 900* і *DCS 1800*

Таблиця. 11.1.

Клас	<i>GSM 900</i>	<i>DCS 1800</i>
1	320 Вт (55 дБм)	20 Вт (43 дБм)
2	160 Вт (52 дБм)	10 Вт (40 дБм)
3	80 Вт (49 дБм)	5 Вт (37 дБм)
4	40 Вт (46 дБм)	2,5 Вт (34 дБм)
5	20 Вт (43 дБм)	---
6	10 Вт (40 дБм)	---
7	5 Вт (37 дБм)	---
8	2,5 Вт (34 дБм)	---

Класи потужностей базових станцій в малостільникових системах

Таблиця 11.2.

Клас	<i>GSM 900</i>	<i>DCS 1800</i>
<i>M1</i>	0,25 Вт (24 дБм)	1,6 Вт (32 дБм)
<i>M2</i>	0,08 Вт (19 дБм)	0,5 Вт (27 дБм)
<i>M3</i>	0,03 Вт (14 дБм)	0,16 Вт (22 дБм)

11.3. Модуль транскодера (*TCE*)

Швидкість закодованого сигналу мови в системі *GSM* становить 13 кбіт/с для каналу типу *full-rate* та нижче 7 кбіт/с для каналу типу *half-rate*. В наступних пунктах розділу буде описуватися канал *full-rate*, який є єдиним варіантом, що використовується на першому етапі впровадження системи *GSM*. Якщо в системі *GSM* передаються дані, то їх швидкість (для каналу *full-rate*) не перевищує 13 кбіт/с. Отже, швидкість передачі в радіоканалі системи *GSM*, минаючи канальне кодування, незалежно від виду переданої інформації, становить 13 кбіт/с. З іншого боку, швидкість одного каналу в стандарті *IKM*, який використовується в *A* - інтерфейсі системи *GSM*, становить 64 кбіт/с. Спосіб кодування сигналу мови, застосований в радіоінтерфейсі системи *GSM*, дуже відрізняється від того, який є в *A*-інтерфейсі.

Така ситуація приводить до того, що в системі *GSM*, з метою передачі як сигналів мови, так і даних, на шляху передачі між базовою станцією та комутаційною *MSC* необхідною є трансформація швидкості передачі, а для передачі сигналів мови – додатково також зміна формату передачі сигналів мови з того, який застосовується в системі

GSM, на формат стандарту ІКМ. Ці дві функції виконуються в блоці транскодера. Транскодер діє в двох напрямках, тобто виконує відповідну конверсію стандарту кодування та швидкості передачі як у напрямку від базової станції до центральної *MSC*, так і навпаки.

Транскодер ділить шлях передачі між базовою станцією і комутаційною *MSC* на дві частини: від базової станції до транскодера і від транскодера до комутаційної станції *MSC*. На відрізку від базової станції до транскодера виконується передача мови зі швидкістю 16 кбіт/с, що відповідає одному фізичному каналу *GSM*, причому кожен чотири канали *GSM* зі швидкістю 16 кбіт/с розташовані в одному каналі ІКМ зі швидкістю 64 кбіт/с.

Основною перевагою такого рішення є зменшення коштів передачі по внутрішніх стаціонарних лініях системи *GSM*, порівняно з ситуацією, в якій заміна формату сигналу на формат ІКМ була б уже виконана в базовій станції *BTS*. Стаціонарні лінії між базовими станціями, блоками керування *BSC* і комутаційними станціями *MSC* звичайно орендуються в стаціонарній телефонній мережі. З цієї точки зору корисним є розташування транскодерів поблизу комутаційної станції *MSC*, і такий варіант найчастіше використовується на практиці. З іншого боку, такий спосіб передачі приводить до виникнення небажаних явищ, наприклад, збільшує запізнення, пов'язане з перетворенням сигналів, що може привести до погіршення якості послуг. Виходячи з цього, деякі оператори вирішують іноді розмістити транскодери при блоках керування *BSC* або при базових станціях *BTS*.

З точки зору стандарту *GSM* інтерфейс А допускає передачу одиночного сигналу мови виключно зі швидкістю 64 кбіт/с, отже транскодер функціонально завжди належить до ансамблю базових станцій, незалежно від свого фізичного положення. На практиці транскодер часто знаходиться біля комутаційної станції *MSC* і є відокремленим від неї функціонально інтерфейсом А.

У випадку телефонного з'єднання, яке встановлюється між двома абонентами тієї самої системи *GSM*, сигнал мови міг би весь час залишатися в форматі 13 кбіт/с, без потреби заміни на формат ІКМ. Теперішній стандарт *GSM* не передбачає такої можливості, і сигнал мови, який передається навіть між абонентами, що знаходяться в одній комірці системи *GSM*, повинен бути перетворений в форму ІКМ і у зворотному напрямку.

Розподіл функцій між елементами мережі GSM

Таблиця. 11.3

Функція	Місце виконання				
	MS	BTS	TCE (TRAU)	BSC	MSC
Управління трансмісійними каналами в стаціонарній частині системи GSM					
Ділянка <i>MSC-BSC</i> :					
- виділення каналів					X
- виявлення блокади				X	
Ділянка <i>BSC-BTS</i> :					
- виділення каналів				X	
- виявлення блокади		X			
Управління радіоканалами					
Конфігурування каналів					
Скакування по частотах:					
- управління				X	
- виконання	X	X			
Управління мовними каналами TCH:					
- виділення (вибір) каналів				X	
- контролювання з'єднання				X	
- звільнення каналу				X	
- контролювання "мертвих" каналів		X			
- управління потужністю мобільних станцій				X	
Управління індивідуальними каналами керування SDCCH:					
- виділення каналів <i>SDCCH</i>				X	
- контролювання з'єднання				X	
- звільнення каналу				X	
- управління потужністю				X	
Управління трансляційними та спільними сигналізаційними каналами BCH і CCCH:					
- циклічне генерування повідомлень-управління					X
- циклічне генерування повідомлень-виконання				X	
Доступ до індивідуального каналу керування SDCCH:					
- виявлення вимоги доступу		X			
- виділення каналу				X	
Канальне кодування і декодування					
Зміна формату кодування					
			X		
Вимірювання:					
- вимірювання сигналу в каналі "вниз"	X				
- вимірювання сигналу в каналі "вгору"		X			
- обробка результатів вимірювань отриманих з MS і BTS				X	
- вимірювання навантаження					X
Передача з випередженням:					
- обчислення величини випередження		X			

- сигналізація до <i>MS</i> при встановленні з'єднання				X	
- сигналізація до <i>MS</i> під час тривання з'єднання		X			
Шифрування:					
- управління (ключ з <i>MSC</i>)				X	
- виконання (ключ з <i>BSC</i>)		X			
Виклик мобільної станції:					
- ініціалізація					X
- виклик-управління				X	
- виклик-виконання		X			
Перемикання каналів в рамках одного блока управління <i>BSC</i>				X	
Перемикання каналів між різними блоками управління <i>BSC</i>:					
- розпізнавання причини (якість передачі)				X	
- розпізнавання причини (навантаження)					X
- рішення					X
- виконання		X			
Управління "мобільністю" абонентів					
Ідентифікація абонента					X
Уточнення інформації про місце перебування абонента					X

12. Обладнання комутаційної підсистеми (SSS)

12.1. Архітектура і функції центру комутації мобільної служби (MSC)

У відповідності до структури системи мобільного радіозв'язку розглянемо більш детально структуру і функції кожного з модулів комутаційної системи GSM стандарту.

На практиці ЦКМС (MSC) і РМБА (VLR) інтегровані в одному вузлі, тому що вони обмінюються великим об'ємом інформації під час кожного виклику. Окреме їх розташування привело б до значного збільшення навантаження сигнального тракту.

Якщо в ЦКМС вмонтовані функції доступу, то він буде функціонувати як міжнародний центр комутації мобільної служби МнЦКМС (GMSC – *Gateway Mobile Services Switching Center*).

Регістр місцезнаходження базових абонентів РМБА (HLR) може бути самостійним або суміщеним з MSC/VLR. Центр перевірки автентичності (дійсності) абонента ЦПА (AUC – *Authentication Centre*) вмонтований в зовнішній комп'ютер і з'єднаний з РМБА (HLR) через систему введення/виведення (I/O – *Input-Output*) або сигнальний термінал.

Регістр ідентифікації мобільного обладнання РІМО (EIR – *Equipment Identity Register*) являє собою базу даних, вмонтовану у зовнішній комп'ютер, яка містить дані для перевірки автентичності мобільних станцій і сприяє запобіганню застосування її без дозволу.

Необхідно відмітити, що комутаційна цифрова система GSM стандарту, порівняно з аналоговими системами, потребує набагато більшої ємності, що пов'язано із збільшенням “сигнального” навантаження і більшою складністю процедури встановлення зв'язку, поновлення та реєстрації абонентів. Все це накладає свої особливості на структуру і можливості системи керування.

Ємність комутаційної системи залежить від принципу розміщення по всій системі найбільш важливих пристроїв керування.

Гнучкість, яка властива розподіленому керуванню, полегшує введення і модифікацію різних послуг. Так, наприклад, один ЦКМС EWSD може обслуговувати до 65000 мобільних абонентів, що потребує використання найбільш потужного координаційного процесора (CP-*Coordination Processor*). Координаційний процесор керує базою даних, а також конфігурацією і координаційними функціями, такими як, наприклад:

- запам'ятовування і керування всіма програмами, станційними і абонентськими даними;
- обробка одержаної інформації для маршрутизації, обліку вартості та ін.;
- зв'язок із центром технічної експлуатації та технічного обслуговування (ОМС);

- нагляд за станом всіх підсистем, приймання даних про помилки, аналіз і повідомлення про них, обробку аварійної сигналізації, виявлення помилок, визначення їх місцезнаходження і нейтралізацію, а також керування функціями конфігурації системи;
- керування інтерфейсом людина-машина (*MMI*).

Координаційні процесори *EWSD* являють собою мультиплексори, що дозволяють нарощування їх до максимальної продуктивності.

В системі використовується паралельна робота двох або більше ідентичних процесорів з розподіленням навантаження і можливістю функціонування в режимі резервування. Тобто, при виході з ладу одного процесора його функції приймає на себе інший (або інші).

Всі керуючі системи станції базуються на 32 розрядних мікропроцесорах з мікросхемами пам'яті 4 Мбіт, а також з використанням окремих цифрових сигнальних процесорів (*DSP*) для обробки сигналів.

Мультипроцесорна система робить більш доступними технологічні удосконалення (наприклад, збільшення швидкості процесу обробки, а також безперервне поліпшення характеристик).

Враховуючи, що *MSC* і *VLR* інтегровані в одному вузлі *MSC/VLR*, то розгляд окремих модулів системи почнемо з *VLR*.

Регістр місцезнаходження відвідуваних (візитних) абонентів

Для забезпечення контролю за переміщенням мобільної станції із зони в зону використовується регістр місцезнаходження відвідуваних (візитних) абонентів РМВА (*VLR*). Якщо при переміщенні мобільна станція переходить із однієї локальної області, що обслуговується модулем керування базових станцій (*BSC*), в іншу локальну область другого *BSC*, то мобільна станція реєструється новим модулем *BSC* і в *VLR*, куди заноситься інформація про номер області зв'язку, яка забезпечує доставляння викликів мобільної станції.

Регістр *VLR* зберігає дані, аналогічні даним *HLR*. Дані в *VLR* зберігаються до тих пір, поки мобільний абонент знаходиться у відвідуваній зоні. Так як локальній області присвоюється ідентифікаційний номер, а кожний регістр *VLR* утримує дані про абонентів у декількох локальних областях, то при переміщенні мобільного абонента з однієї локальної області в іншу дані про його місцезнаходження автоматично відновлюються в *VLR*. Якщо стара і нова області обслуговуються різними *VLR*, то інформація зі старого *VLR* копіюється в новий і після цього в старому стирається. Поточна адреса абонента *VLR*, який утримується в *HLR*, також оновлюється.

Коли *MC* (*MS*) приймає вхідний виклик, *VLR* вибирає і присвоює номер відвідуваної *MC* (роумінг номер) (*MSRN – Mobile Station Roaming Number*) і передає його або на ЦКМС (*MSC*), який забезпечує маршрутизацію цього виклику до базових станцій, що знаходяться поряд з *MA*. *VLR* також розподіляє номери передачі керування при передачі з'єднань від одного ЦКМС до іншого.

Крім того, *VLR* керує розподілом новими тимчасовими ідентифікаційними номерами мобільного абонента *ТІНМА* (*TMSI* – *Temporary Mobile Subscriber Identity*) і передає їх в *HLR*. Він також керує процедурами встановлення автентичності під час обробки виклику.

Отже, *VLR* являє собою локальну базу даних про мобільного абонента для тієї зони, де знаходиться абонент, що дозволяє виключити постійне запитування в *HLR* і скоротити час на обслуговування викликів.

Доступ до бази даних *VLR* може забезпечуватись через міжнародний ідентифікаційний номер мобільного абонента (*МІНМА*) (*IMSI* – *International Mobile Subscriber Identity*) або номер відвідуючої мобільної станції *MSRN* (*Mobile Station Roaming Number*).

Центр комутації мобільної служби з регістром місцезнаходження відвідуваних (візитних) абонентів

Система *ЦКМС/РМБА* (*MSC/VLR*) і міжнародного центру комутації мобільної служби *МнЦКМС* (*GMSC*) являють собою однакові цифрові автоматичні комутаційні системи стільникової мережі мобільного зв'язку, які повністю відповідають вимогам *GSM* стандарту і виконані на базі цифрової АТС. Система *МнЦКМС* використовується як вхідна транзитна станція.

ЦКМС/РМБА (*MSC/VLR*) забезпечує комутацію викликів і являє собою контрольну точку функцій перемикання зв'язку і відновлення місцезнаходження абонента.

ЦКМС (*MSC*) відповідає за встановлення зв'язку, його контроль і тарифікацію. *РМБА* (*VLR*) забезпечує запам'ятовування та поновлення абонентських даних.

Центр комутації *GMSC* забезпечує взаємозв'язок з мережею *PLMN* та іншими мережами і являє собою точку входу для викликів, які направляються до мобільних абонентів. На базі одержаних від *РМБА* (*HLR*) даних про місцезнаходження *МС* (*MS*) *GMSC* спрямовує виклик до *ЦКМС/РМБА*, (*MSC/VLR*), який керує відповідною зоною обслуговування (*ТА*).

Як уже відмічалось, апаратура системи *GMSC*, *MSC/VLR* однакова і виконана по технології відповідної АТСЕ, що дозволяє їх об'єднати (інтегрувати) в загальний вузол.

На рис.12.1 приведена загальна структура комутаційної системи (*КС*) (*АРТ*), яка входить до складу *MSC/VLR* і *GMSC* мобільної мережі системи *СМЕ-20*.

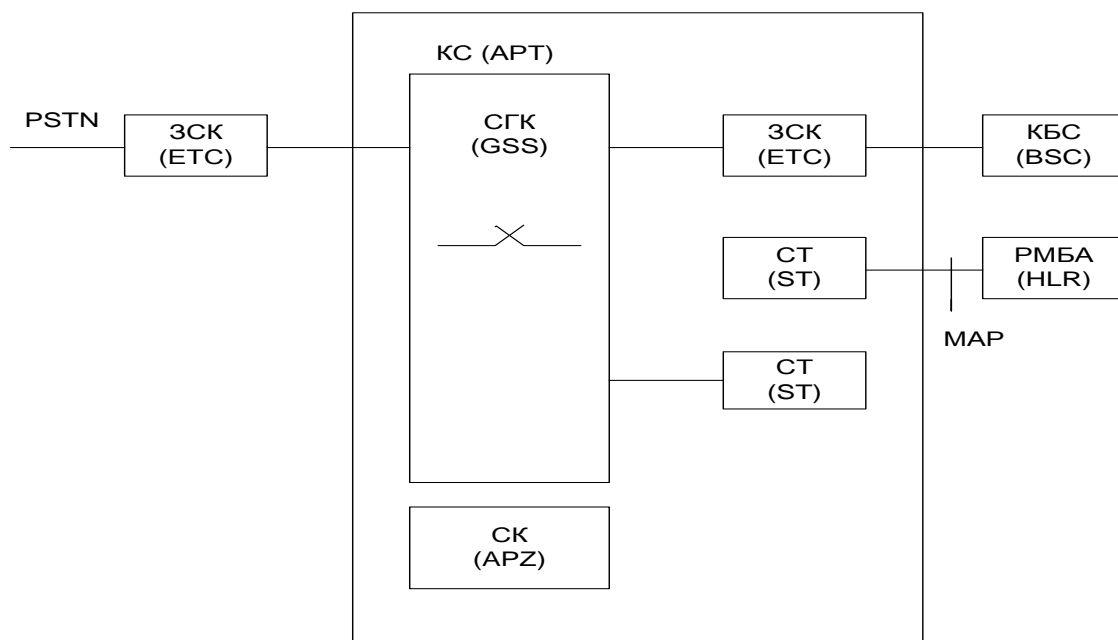


Рис. 12.1. Загальна структура комутаційної системи

Мобільна телефонна підсистема (*MTS - Mobile Telephone Subsystem*) реалізує більшість із таких “мобільних функцій”:

- функції доступу для встановлення і контролю виклику від *MC (MS)*;
- функції перемикання зв'язку (*SCIP – процес*);
- функції поновлення місцезнаходження *MC (MS)*;
- функції сигналізації між *MSC/VLR* і прикладною підсистемою базових станцій *BSC-BSSAP (Base Station System Application Part)*, тобто прикладної частини прямої передачі і прикладної частини системи керування підсистемою мобільного зв'язку *DTAP/BSSMAP (Direct transfer Application Part/Base Station System Management Application)*;
- функції адміністрування даних про мобільних абонентів;
- функції шифрування мови;
- функції перевірки автентичності (дійсності) мобільних абонентів.

Виконання всіх цих функцій забезпечує система керування (*СК*) за допомогою процесора *APZ*.

Для комутації з'єднань в системі використовується система групової комутації (*СГК*) (*GSS – Group Switch System*).

Для сигналізації по спільному каналу *CCS № 7* використовується сигнальний термінал (*СТ*) (*ST-Signaling Terminal*), для якого виділений один 64-кбіт/с часовий інтервал *IKM* системи, а взаємодія із загальностанційним комплектом *ЗСК (ETC – Exchange Terminal Circuit)* здійснюється напівпостійним зв'язком через *GSS*.

Загальностанційний комплект (*ЗСК*) (*ETC*) забезпечує взаємодію зі стаціонарною мережею *PSTN*, а також з модулем керування (контролером) базовими станціями *КБС (BSC)*. Взаємодія *КС* з *HLR*

виконується також за допомогою сигнального терміналу *ST* і підсистеми мобільного зв'язку *MAP*.

Регістр місцезнаходження базових абонентів

Регістр місцезнаходження базових (домашніх) абонентів (РМБА) (*HLR – Home Location Register*) містить дані про всіх абонентів, які закріплені за зоною обслуговування оператора стільникового зв'язку на постійній основі. Національний оператор має, як правило, один базовий регістр *HLR*, який зберігає дані двох типів:

- дані, які вносяться оператором (абонентський номер, категорія абонента та ін.);
- динамічні дані (місцезнаходження абонента в даний момент, додаткові послуги, які виділені користувачу та ін.).

За допомогою регістрів *HLR* і *VLR* ЦКМС здійснює постійний контроль за мобільними станціями.

В *HLR* зберігається та частина інформації про місцезнаходження будь-якої станції, яка дозволяє ЦКМС доставити виклики відповідної станції. Регістр *HLR* утримує також міжнародний ідентифікаційний номер мобільного абонента *MINMA (IMSI – International Mobile Subscriber Identity)*, який використовується для впізнання мобільної станції в центрі перевірки автентичності (дійсності) абонента ЦПА (*AUC – Authentication Centre*). Виходячи із сказаного, можна вважати, що регістр *HLR* являє собою довідникову базу даних про постійно приписаних в мережі абонентів.

В *HLR* знаходяться розпізнавальні номери і адреси, а також параметри автентичності абонентів, склад послуг зв'язку, спеціальна інформація маршрутизації та ін. В *HLR* проводиться реєстрація даних про роумінг абонента, включаючи дані про тимчасовий ідентифікаційний номер мобільного абонента *TINMA (TMSI – Temporary Mobile Subscriber Identity)* і про відповідний *VLR*.

До даних регістра *HLR* мають дистанційний доступ всі *MSC* і *VLR* мережі, а якщо в мережі є декілька *HLR*, то в базі даних утримується тільки один запит про абонента, тому *HLR* являє собою частину загальної бази даних мережі про абонентів.

Доступ до бази даних про абонентів здійснюється по міжнародному номеру *IMSI*, або по міжнародному ідентифікаційному номеру мобільного абонента в мережі *ISDN (MSISDN – Mobile Station International ISDN Number)*. До бази даних *HLR* можуть одержати доступ *MSC* або *VLR*, які відносяться до інших мереж, в рамках забезпечення роумінгу абонентів між мережами.

Таким чином, при пересуванні абонента із однієї зони обслуговування *MSC/VLR* в іншу (роумінг) дані другого типу повинні постійно поновлюватись. Крім того, дані другого типу змінюються при введенні чи скасуванні додаткових послуг з боку абонента.

Структура системи *GSM* забезпечує реалізацію *HLR* у вигляді наземного модуля *MSC/VLR* або інтегрованого з ним. Інтеграція *MSC/VLR* зручна для невеликих систем *GSM*, які запроваджуються на початку побудови мережі. При цьому буде значна економія в апаратних засобах, а також зменшення сигнального навантаження між *MSC/VLR* і *HLR*.

При нарощуванні системи, тобто при збільшенні навантаження на РМБА (*HLR*), він легко розміщується на відстані від модуля *MSC*. Для виконання своїх функцій *HLR* має програмне забезпечення, яке повністю погоджено з програмним забезпеченням ЦКМС.

Так у відповідності зі стандартом *GSM*, для прикладу на базі системи *СМЕ-20* структура програмного забезпечення *HLR* і системи керування СК (*APZ*) приведена на рис. 12.2.

Окрема система керування СК (*APZ*) містить чотири процеси комутаційних систем АРТ, кожен з яких виконує конкретні функції:

- підсистема реєстрації базових абонентів ПРБА (*HRS – Home Location Register Subsystem*), в якій зберігаються всі абонентські дані (номер, категорія, статус, місцезнаходження абонента та ін.);
- підсистема сигналізації по спільному каналу зв'язку ПССК (*CCS – Common Channel Signaling Subsystem*), яка в свою чергу має окремі допоміжні частини: для передачі повідомлень *MTP (Message Transfer Part)*, підсистема керування з'єднаннями сигналізації *SCCP (Signaling Connection Control Part)* і частину телефонного користувача *TCAP (Transaction Capabilities Application Part)*;
- підсистема технічної експлуатації та обслуговування ПТЕО *OMS (Operation and Maintenance Subsystem)*, яка зберігає стандартні функції нагляду та технічного обслуговування системи;
- підсистема статистики і вимірювання трафіку ПСтВТр (*STS – Statistics and Traffic Measurement Subsystem*), яка збирає, зберігає, обробляє і видає статистичні дані. Аналогічні функції реалізує РМБА інших систем *GSM* стандарту.

Апаратурна частина РМБА (*HLR*) складається з окремого процесора *APZ* (рис. 12.2), а також системи введення/виведення (*I/O- Input/Output*) *G11B* і декількох сигнальних терміналів *ST* (рис. 12.1). Структура апаратурної частини РМБА (*HLR*) у взаємодії з окремими вузлами і модулями приведена на рис. 12.3. Для надійності окремі елементи (вузли) реєстра *HLR* дубльовані.

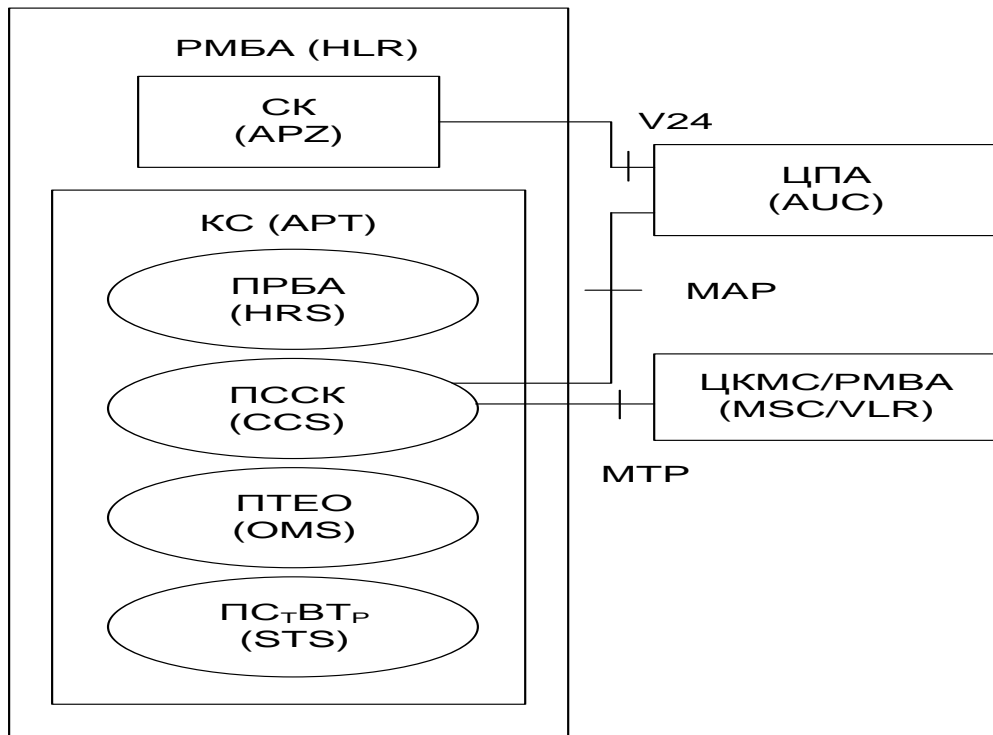


Рис. 12.2.

Основою апаратної частини *HLR* є центральний процесор *CP-A* з відповідною пам'яттю для зберігання програмного забезпечення і банку даних, де зберігаються необхідні характеристики базових (домашніх) абонентів.

Для спілкування оператора з регістром використовується система введення/виведення (*I/O*) *G11B*, яка взаємодіє з центральним процесором *CP-A* через процесори підтримки (*SP-Support Processor*) і відповідні шини сполучення (*ШС*).

Зв'язок регістра *HLR* з *ЦКМС (MSC)* виконується за допомогою регіональних процесорів *RP (Regional Processor)* і загальних сигнальних терміналів *ST-7*. Безпосереднє погодження з *MSC* чи *GMSC* виконується за допомогою мультиплектора *MUX*.

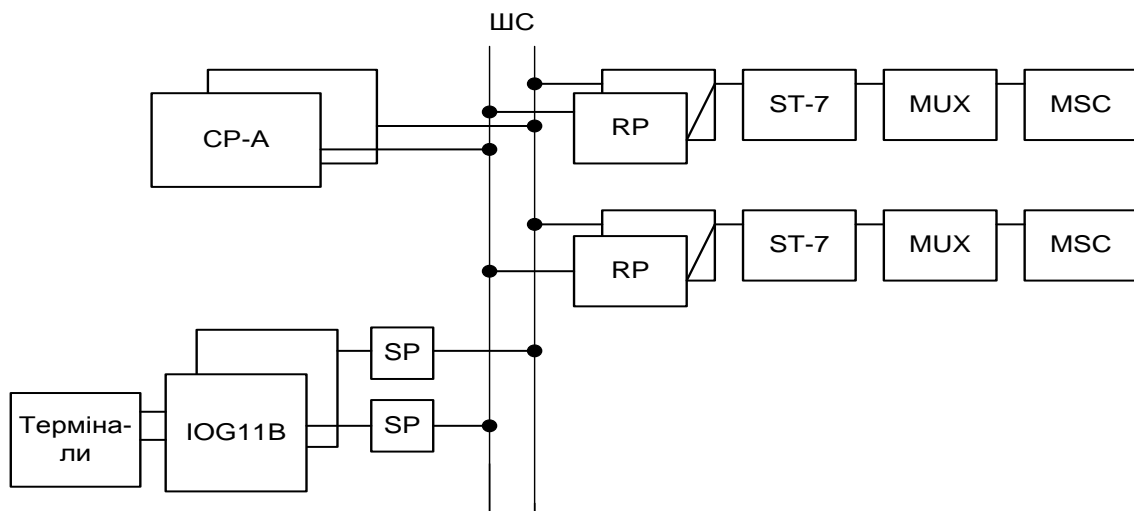


Рис. 12.3

Як уже відмічалось, реєстр *HLR* може використовуватись для двох центрів комутації *MSC*, що відображено на рис. 12.3.

Ємність реєстра *HLR* залежить як від потужності центрального процесора, так і від ємності блоку пам'яті. Розрахунки для вибору центрального процесора і ємності пам'яті *HLR* виконуються окремо для кожної мережі. Так в системі *CME-20* використовується найпотужніший процесор *APL21210*, який дозволяє незалежному реєстру *HLR* обслуговувати до 300 000 мобільних абонентів.

12.2. Центр перевірки автентичності (*AUC*).

В стандарті *GSM* для виключення несанкціонованого використання ресурсу мобільної системи зв'язку запроваджуються механізми перевірки автентичності абонента. Для виконання цієї функції використовується центр перевірки автентичності ЦПА (*AUC – Authentication Centre*), який являє собою окремий модуль системи *GSM* мережі. Він відповідає за перевірку трьох функцій (триплет), що дозволяють визначити автентичність (дійсність) або неавтентичність (недійсність) абонента.

Схема ЦПА (*AUC*) має необхідні вузли і відповідне програмне забезпечення для реалізації трьох наступних функцій (триплет):

1. Визначення випадкового номера абонента *RAND* (*Randon Number*).
2. Визначення на базі функції *RAND* і таємного ключа K_i (*Individual Subscriber Authentication Key*) сигналу підтвердження *SPES* (*Signal Response*). Ключ K_i надається оператором кожному абоненту.
3. Визначення функції шифрування за допомогою ключа шифрування K_c (*Ciphering Key*), який базується на окремому алгоритмі, що використовує результати *RAND* і K_i в якості вхідних даних.

Для виконання названих трьох функцій (триплет) в схемі ЦПА використовуються три програми реалізації алгоритму з відповідною базою даних. Процес ідентифікації абонента виконується як на місцевому, так і на міжнародному рівнях.

Для реалізації трьох функцій (триплет) в ЦПА (*AUC*) використовується ряд взаємозв'язаних персональних комп'ютерів *PC-AUC* (*Personal Computer AUC*), що являють собою центр перевірки автентичності. Спрощений варіант структури їх взаємодії між собою та з РМБА (*HLR*) наведений на рис. 12.4.

Система складається з одного головного центру перевірки автентичності *MAUC* (*Master AUC*), з 1 ... *N* персональних комп'ютерів *PC-AUC*. Комутацію і розподілення абонентів виконує система *SAS* (*Subscriber Administration System*).

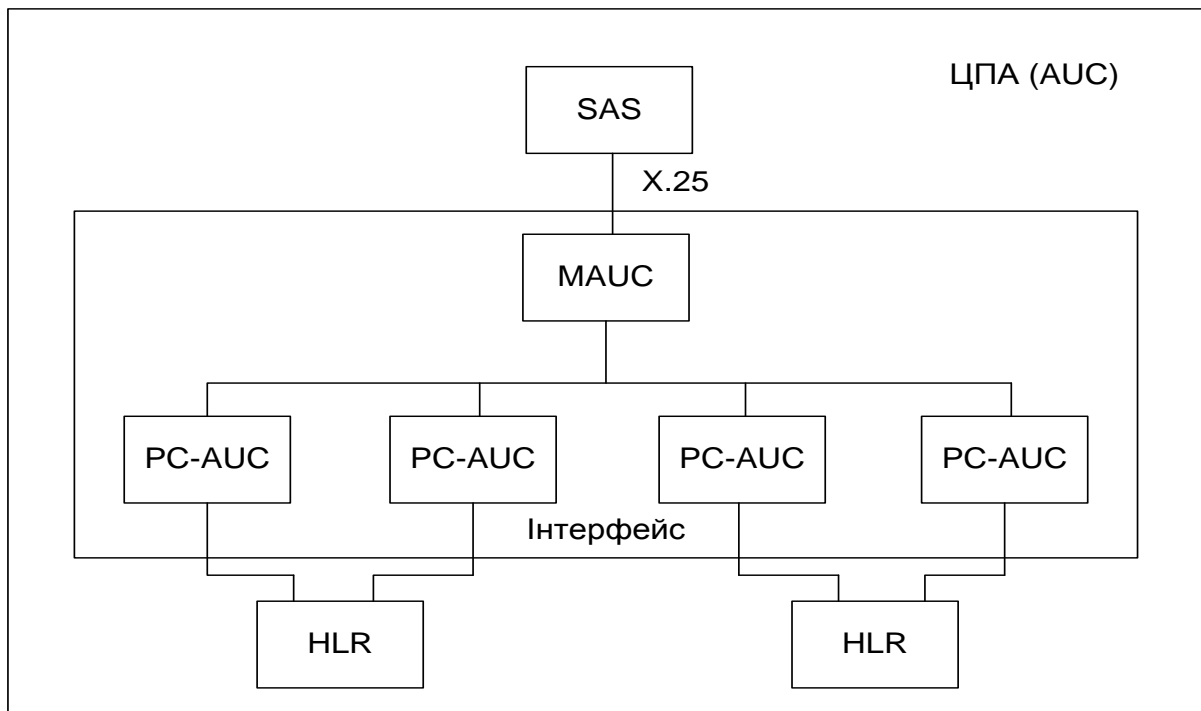


Рис. 12.4.

Дані про абонентів поступають з *HLR*. Взаємодія між персональними процесорами з *SAS* виконується за допомогою протоколу передачі пакетів X.25, а з *HLR* – через відповідний інтерфейс в залежності від місця розміщення модулів *HLR* і *AUC*.

Оператори адміністрації в *SAS* надають кожному абонентському номеру таємний ключ K_i , який необхідний *PC-AUC* для формування трьох функцій перевірки автентичності. Запит для оновлення даних надходить від головного центру перевірки автентичності *MAUC*, який для надійності координує надходження даних *SAS* до окремого *PC-AUC*, або до групи *PC-AUC*. Групи *PC-AUC* також визначаються в *MAUC*, де вирішується якій групі *PC-AUC* необхідно передати запит.

12.3. Регістр ідентифікації мобільного обладнання

Для запобігання несанкціонованого використання мобільної станції (наприклад, вкраденої) використовується регістр ідентифікації мобільного обладнання *PIMO* (*EIR – Equipment Identity Register*), який з'єднаний з *ЦКМС/PMBA* (*MSC/VLR*).

EIR містить централізовану базу даних для підтвердження дійсності міжнародного ідентифікаційного номера мобільної обладнання (*МІНМО*) (*IMEI – International Mobile Equipment Identity*). Ця база даних виключно відноситься до обладнання мобільної станції. База даних *EIR* містить номери *IMEI*, які організовані у вигляді трьох різних списків:

1. Список, що утримує серії номерів *IMEI* всіх санкціонованих *МС*, які були видані в системі *GSM* різних країн – “білий список”.

2. Список, що утримує всю міжнародну ідентифікацію обладнання *IMEI* мобільних станцій, які вкрадені або яким відмовлено в обслуговуванні з іншої причини – “чорний список”.
3. Список, який визначений оператором всіх номерів *IMEI* несправних МС – “сірий список”.

MSC/VLR запитує у мобільної станції міжнародну ідентифікацію обладнання *IMEI* і просліджує її в *EIR*.

Так як *EIR* з'єднаний безпосередньо з *MSC/VLR*, то результат надсилається в *MSC/VLR* і впливає на рішення про дозвіл доступу даної МС в систему.

До бази даних *EIR* одержує дистанційний доступ ЦКМС (*MSC*) даної мережі, а також *MSC* інших мобільних мереж. Мережа, як і у випадку з *HLR*, може використовувати більше одного *EIR*, кожен з яких керує певними групами міжнародного ідентифікаційного номера обладнання мобільної станції *IMEI*.

13. Формування сигналу в радіоканалі

Основні етапи обробки сигналу та їх послідовність (див. блок-схему на рис. 13.1):

- аналого-цифрове перетворення;
- кодування мови (в т.ч. сегментація);
- канальне кодування (в т.ч. перемежування);
- модуляція і передача ВЧ сигналу.

Крім того, виконуються наступні процедури:

- шифрування;
- форматування кадру TDMA.

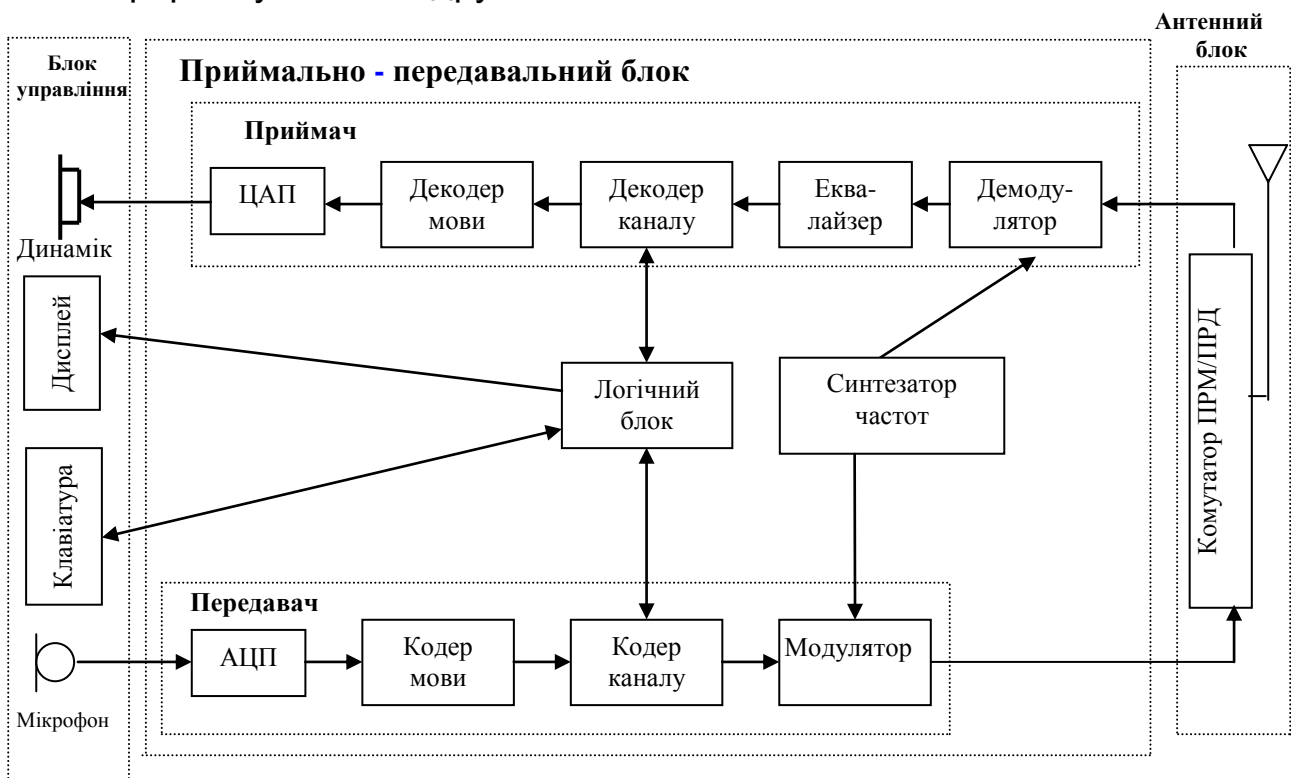


Рис. 13.1. Блок-схема мобільної станції

13.1. Аналого-цифрове перетворення

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) (*A/D Conversion*) є першою єдиною ланкою між аналоговою і цифровою ділянками тракту передачі, що перетворює аналоговий сигнал з виходу мікрофона в цифрову форму. ЦАП у прийомному тракті виконує зворотну функцію.

Робота АЦП складається з трьох етапів:

- дискретизація вхідного безперервного сигналу в часі (звичайно з постійним кроком);
- квантування величини сигналу по рівнях;
- кодування.

В результаті роботи АЦП на виході формуються двійкові числа, які відповідають рівням сигналу в моменти дискретизації.

Частота дискретизації визначається за теоремою Котельникова і для мовного сигналу, що при передачі обмежується смугою 0,3.....3,4 кГц, вибирається рівною 8 кГц. Розрядність АЦП в телефонії звичайно вибирається рівною 8, включаючи знаковий розряд. Таким чином, діапазон чисел (рівнів) на виході АЦП складає від -127 до 127 (тому що $(2^7-1) = 127$). В результаті на виході АЦП виходить потік 8-бітових чисел, що слідує з частотою 8 кГц, тобто *швидкість потоку інформації на виході АЦП* складає 64 кбіт/с.

В GSM використовують 13-бітові АЦП (8192 рівнів квантування), які при частоті дискретизації 8 кГц формують цифровий потік зі швидкістю 104 кбіт/с. В одному частотному каналі сумарна швидкість потоку при цьому дорівнює $(8 \cdot 104) = 832$ кбіт/с, що не можливо передавати в смузі 200 кГц із застосуванням модуляції GMSK. Для зниження швидкості передачі застосовують мовне кодування.

13.2. Кодування мови

Основна задача кодера - максимально можливий стиск сигналу мови, представленого в цифровій формі, за рахунок усунення надмірності мовного сигналу, але при збереженні прийнятної якості передачі мови.

Це дозволяє *зменшити швидкість цифрового інформаційного потоку*, що приводить до *зменшення необхідної смуги частот в радіозв'язку*. Завдяки цьому більш ефективно використовують наявний частотний ресурс.

Компроміс між ступенем стиску і збереженням якості визначається експериментально, а проблема одержання високого ступеня стиску без надмірного зниження якості складає основні труднощі при розробці кодера.

У приймальному тракті перед ЦАП розміщується **декодер** мови, завданням якого є відновлення звичайного цифрового сигналу мови із властивою йому природною надмірністю. Сполучення кодера і декодера називають **кодеком**.

Методи кодування

Історично склалися 2 напрямки кодування мови:

- кодування форми сигналу (*waveform coding*);
- кодування джерела сигналу (*source coding*).

Перший метод заснований на використанні статистичних характеристик сигналу і практично не залежить від механізму формування сигналу. Кодери цього типу із самого початку забезпечували високу якість передачі мови (гарну розбірливість і натуральність мови), але відрізнялися меншою, у порівнянні з другим методом, економічністю.

У методі кодування форми сигналу використовуються три основні способи кодування:

- імпульсно-кодова модуляція - ІКМ (*PCM*);

- диференціальна ІКМ - ДІКМ (*DPCM*);
- дельта-модуляція - ДМ (*DM*).

ІКМ відповідає цифровий сигнал безпосередньо з виходу АЦП, у ньому зберігається вся надмірність аналогового мовного сигналу. При ДІКМ ця надмірність зменшується за рахунок того, що квантуванню з наступним кодуванням і передачею по лінії зв'язку піддається різниця між вихідним мовним сигналом і його прогнозованим значенням, а при прийомі різницевої сигнал складається з прогнозованим значенням, отриманим по тому ж алгоритму пророкування. Шкала квантування може бути рівномірною, нерівномірною або адаптивно змінюваною; пророкування сигналу може бути незалежним від форми останнього або залежати від форми сигналу, тобто бути адаптивним. Якщо при кодуванні сигналу використовуються елементи адаптації, то відповідний різновид ДІКМ називають адаптивною ДІКМ – АДІКМ (*Adaptive DPCM - ADPCM*). ДМ – це ДІКМ з однобітовим квантуванням, яка теж може бути адаптивною (АДМ).

У стільниковому зв'язку використовується винятково другий метод кодування, як більш економічний (забезпечує коефіцієнт стиснення порядку 5...8 із збільшенням його в перспективі ще вдвічі).

Метод кодування джерела сигналу (чи кодування параметрів сигналу) спочатку ґрунтувався на даних про механізми мовотворення, тобто використовував модель голосового тракту і приводив до систем типу аналіз-синтез, одержав назву *вокодерних систем* чи *вокодерів* (*vocoder* - скорочення від *voice coder*, тобто кодер голосу або кодер мови). Вже перші вокодери дозволяли одержувати дуже низьку швидкість передачі інформації, але при характерній «синтетичній» якості мови на виході. Тому вокодерні методи довгий час не знаходили широкого практичного застосування. Ситуація змінилася з розробкою *методу лінійного пророкування* (ЛП), запропонованого в 60-х роках, яке здобуло могутній розвиток і практичну реалізацію у 80-х.

Саме вокодерні методи на основі ЛП і застосовуються в стільниковому зв'язку. Оцінка переданих по лінії зв'язку параметрів виконується на основі статичних характеристик сигналу по жорстко визначеному алгоритму, як і при кодуванні форми сигналу.

Реалізуються кодекі на основі цифрового сигнального процесора *DSP* (*digital signaling processor*), який призначений для стиснення мовного сигналу за рахунок видалення надмірності, звичайно, без істотної втрати якості початкового сигналу, або з можливістю регулювання якості.

В системах стільникового зв'язку в залежності від поколінь та стандартів використовують різні типи кодеків:

- *FR* (*Full Rate*)
- *HR* (*Half Rate*)
- *EFR* (*Enhanced Full Rate*)
- *AMR* (*Adaptive Multi Rate*)

- AMR-WB (*Adaptive Multi-Rate Wideband*).

В основу кодека *Full Rate* покладено кодування мови на основі методу ЛП (*LPC - Linear Predictive Coding*), який полягає в тому, що по лінії зв'язку передаються не параметри мовного сигналу, а параметри деякого фільтра, еквівалентного голосовому тракту, і параметри сигналу збудження цього фільтра.

В якості фільтра використовується фільтр ЛП. Завдання кодування на передавальному кінці лінії зв'язку полягає в оцінці параметрів фільтра і параметрів сигналу збудження, а завдання декодування на приймальному кінці – у пропусканні сигналу збудження через фільтр, на виході якого формується відновлений сигнал мови. Різні варіанти алгоритмів кодування відрізняються один від іншого набором переданих параметрів фільтра, методом формування сигналу збудження й ін.

Для зменшення швидкості бітового потоку, що представляє собою закодовану мову, є передача інформації про мову, а не самої мови, тобто в системі *GSM* безпосередньо мовні сигнали не передаються. Замість мови передаються параметри мовлення: тон (частота мовного сигналу), тривалість конкретного тону, висота звуку (рівень мовного сигналу). Параметри мові після їх генерації передаються по радіоканалу до приймача, який відтворює мову за отриманими параметрами мови.

Оскільки мовні органи є досить інерційними, то параметри фільтра, що представляє мовні органи, залишаються постійними протягом мінімум 20 мс. У зв'язку з цим при мовному кодуванні в системі *GSM* використовується блочне кодування з тривалістю кожного блоку в 20 мс. Кодування здійснюється одним набором бітів. Насправді даний процес схожий на оцифровку мови з частотою 50 разів на секунду замість 8000, як це використовується при стандартному аналого-цифровому перетворенні. Замість використання кодування послідовністю з 13 бітів, застосовуваного в аналого-цифровому перетворенні, в мовному кодуванні використовується кодування послідовністю з 260 бітів. Отже, загальна швидкість передачі мовної інформації становить $50 \times 260 = 13$ кбіт/с.

Процедура кодування мови в методі ЛП полягає в наступному (рис.13.2):

1) цифровий потік сигналу мови розбивається на сегменти тривалістю 20 мс;

2) для кожного сегмента оцінюються параметри фільтра ЛП і параметри сигналу збудження; в якості сигналу збудження у найпростішому випадку може виступити залишок проорокування, який отримується при проходженні сегменту мови через фільтр ЛП із параметрами, які отримуються з оцінки для даного сегменту;

3) параметри фільтра і параметри сигналу збудження кодуються за визначеним законом і передаються в канал зв'язку.

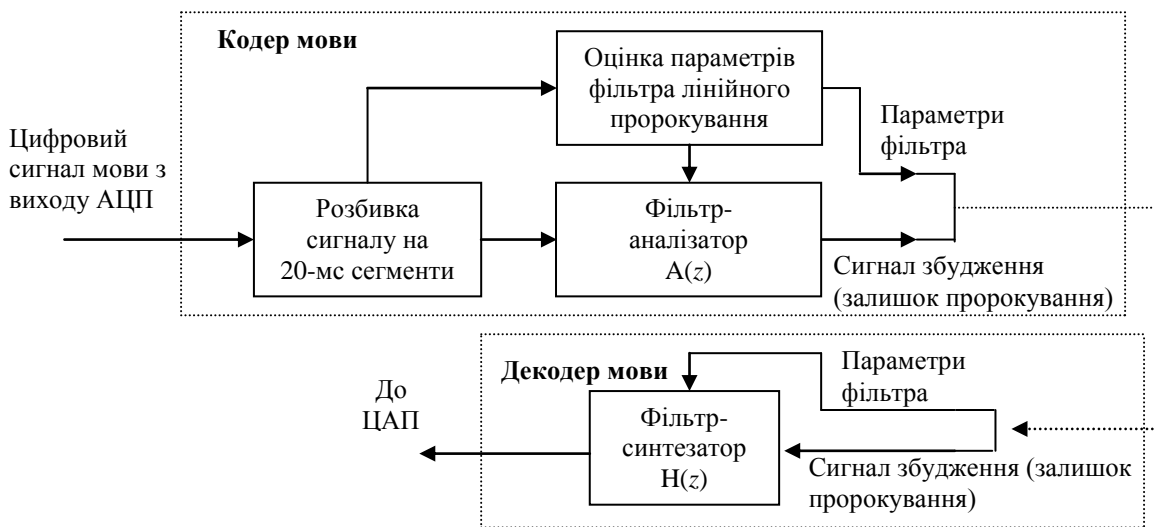


Рис. 13.2. Робота кодека мови в методі лінійного проорокування

Процедура декодування мови полягає в пропущенні прийнятого сигналу збудження через синтезуючий фільтр відомої структури, параметри якого передані одночасно із сигналом збудження.

Практичні схеми складніші за приведений алгоритм. Це викликано в основному наступними двома причинами:

1) описана вище схема ЛП (короткочасне проорокування *STP* - *Short-Term Prediction*) не забезпечує в достатній мірі усунення надмірності мови. Тому, додатково до *STP*, використовується ще довгострокове проорокування (*LTP* - *Long-Term Prediction*), що в значній мірі усуває залишкову надмірність і наближує залишок проорокування за своїми статистичними характеристиками до білого шуму;

2) використання залишку проорокування як сигналу збудження виявляється недостатньо ефективним, тому що вимагає для кодування занадто великого числа біт. Тому практичне застосування знаходять більш економічні (по завантаженню каналу зв'язку, але не по обчислювальних витратах) методи формування сигналу збудження. На даний час використовуються різні варіанти багатоімпульсного збудження.

Оцінка якості кодування мови

При оцінці якості кодування і порівнянні різних кодеків оцінюються розбірливість мови і якість синтезу (якість звучання) мови. Для оцінки розбірливості мови використовується метод *DRT* (діагностичний римований тест). У цьому методі підбираються пари близьких за звучанням слів, що відрізняються окремими приголосними, котрі багаторазово використовуються декількома дикторами, і за результатами випробувань оцінюється частка спотворень. Метод дозволяє одержати як оцінку розбірливості окремих приголосних, так і загальну оцінку розбірливості мови.

Для оцінки якості звучання використовується критерій *DAM* (діагностична міра прийнятності). Випробування полягає в читанні декількома дикторами (чоловіками і жінками) ряду фраз, що прослуховуються на виході тракту зв'язку декількома експертами-слухачами, що виставляють оцінки по 5-бальній шкалі. Результатом є середня суб'єктивна оцінка, або *середня оцінка думок (MOS)*. Хоча цей метод є суб'єктивним, його результати по зіставленню різних типів кодеків при проведенні випробувань тими ж самими групами дикторів і експертів-слухачів є досить об'єктивними, і на них ґрунтуються висновки і рішення.

У таблиці 13.1 приведені результати оцінки чотирьох типів кодеків. Близькі до шкали *MOS* результати дає об'єктивний метод оцінки якості з використанням поняття *кепстральної відстані (Spectrum Distance)*.

Оцінка кодеків мови по шкалі *MOS*

Таблиця 13.1

Тип кодека	Швидкість передачі інформації, кбіт/с	Оцінка <i>MOS</i>
<i>PCM</i>	64	4,12
<i>ADPCM</i>	32	3,78
<i>RPE-LTP</i> (стандарт <i>GSM</i>)	13	3,58
<i>VSELP</i> (стандарт <i>D-AMPS</i>)	8	3,44
<i>CELP</i> (стандарт <i>CDMA</i>)	4,8	3
	9,6	3,7
<i>QCELP</i> (<i>Qualcomm CELP</i>)	13	4,02

Існує безліч варіантів кодеків мови, з яких доводиться вибирати кодек для систем стільникового зв'язку. Наприклад, при розробці стандарту *GSM* були досліджені різні типи кодеків, після чого вибір був зупинений на кодеку ***RPE-LTP*** (*Regular Pulse Excited Long Term Prediction* – довгострокове пророкування з регулярним імпульсним збудженням). Робота з вибору типу кодека для стандарту *GSM* була завершена в 1988 році, а в 1989 р. був запропонований метод *VSELP* (*Vector sum excited linear prediction*), прийнятий потім у стандарті *D-AMPS*. Роботи з удосконалювання кодеків мови продовжуються і в даний час. Обома стандартами (*D-AMPS* і *GSM*) передбачене введення напівшвидкісного кодування, що може збільшити пропускну здатність каналу зв'язку в два рази. Розглядається можливість введення векторного квантувача параметрів лінійних спектральних пар із розщепленням і міжкадровим пророкуванням. Алгоритм кодування *VSELP* належить до класу кодерів мови, відомих як *CELP* (*Code Excited Linear Prediction* – лінійне пророкування з мультикодовим управлінням). Кодери такого типу використовують кодові книги, що містять набори векторів, для апроксимації вектора збудження. Пошук вектора вимагає значної

кількості обчислень навіть для кодових книг мінімально прийнятної розміру. Алгоритм *VSELP* використовує кодові книги спеціальної структури, що дозволяє зменшити витрати на обчислювання.

CELP в даний час використовується як загальний термін для класу алгоритмів, а не для певного кодека.

Обробка мови в GSM здійснюється в рамках прийнятої системи переривчастої передачі мови (*DTX*), яка забезпечує включення передавача тільки тоді, коли користувач починає розмову і відключає його в паузах і наприкінці розмови. *DTX* управляється детектором активності мови (*VAD*), який забезпечує виявлення і виділення інтервалів передачі мови з шумом і шуму без мови навіть в тих випадках, коли рівень шуму досягає рівня передачі мови. До складу системи переривчастої передачі мови входить також пристрій формування комфортного шуму, який включається і прослуховується в паузах мови, коли передавач відключений. Експериментально показано, що відключення фонового шуму на виході приймача в паузах при відключенні передавача дратує абонента і знижує розбірливість мови, тому застосування комфортного шуму в паузах вважається необхідним. *DTX* процес в приймачі включає також інтерполяцію фрагментів мови, втрачених через помилки в каналі.

Для захисту передаваної по радіоканалу інформації від помилок використовують:

- каналне кодування;
- перемежування (інтерлівінг).

13.3. Канальне кодування.

Основна задача кодера каналу – завадостійке кодування (ЗСК) сигналу мови, тобто таке його кодування, що дозволяє виявляти і виправляти помилки, що виникають при поширенні сигналу по радіоканалу.

ЗСК здійснюється за рахунок введення до складу переданого сигналу надлишкової (контрольної) інформації.

У стільниковому зв'язку ЗСК реалізується у вигляді трьох процедур:

- 1) блочного кодування (*block coding*);
- 2) згортаючого кодування (*convolution coding*);
- 3) перемежування (*interleaving*).

Крім того, кодер каналу виконує ще ряд функцій:

- додає керуючу інформацію (яка також піддається ЗСК);
- упаковує підготовлену до передачі інформацію і стискає її в часі – формує кадр *TDMA*;
- здійснює шифрування переданої інформації (якщо це передбачено режимом роботи апаратури).

Послідовність виконання цих операцій показана на блок-схемі рис. 13.3.

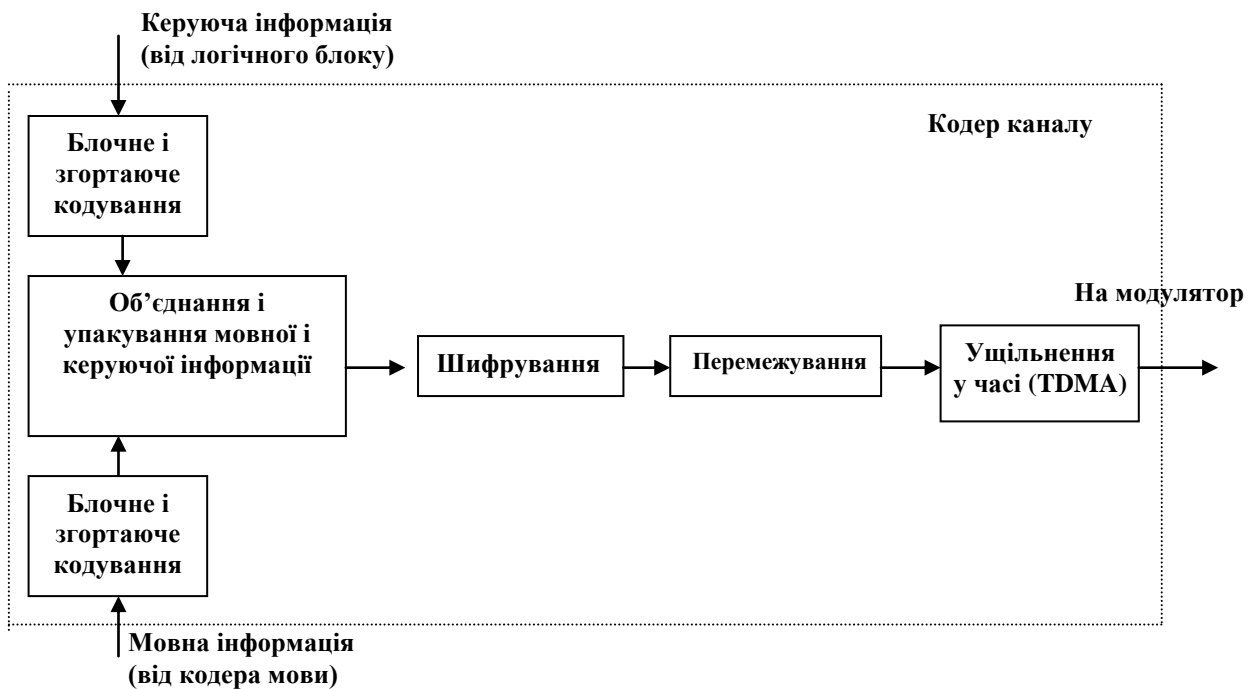


Рис. 13.3. Блок-схема кодера каналу.

При блочному кодуванні вхідна інформація розділяється на блоки, що містять по k символів кожен, які по визначеному закону перетворюються кодером у n -символьні блоки, причому $n > k$. Відношення $R = k/n$ називається *швидкістю кодування* і є мірою надмірності, що вноситься кодером. При раціонально побудованому кодері менша швидкість кодування (тобто велика надмірність) відповідає більш високій завадостійкості сигналу.

При згортаючому кодуванні K послідовних символів вхідної інформаційної послідовності, по k біт у кожному символі, беруть участь в утворенні n -бітових символів вихідної послідовності, $n > k$, причому на кожний символ вхідної послідовності приходиться по одному символу вихідної. Кожен біт вихідної послідовності формується за результатом підсумовування по модулю 2 декількох біт. Згортаючий кодер з параметрами n, k, K позначається (n, k, K) . Відношення $R = k/n$, як і в блочному кодері, називається *швидкістю кодування*. Параметр K називається *довжиною обмеження* і визначає довжину регістра зсуву (у символах).

Перемежування являє собою таку зміну порядку проходження символів інформаційної послідовності (тобто перестановку), при якій символи, що стояли поряд, виявляються розділеними декількома іншими символами. Така процедура застосовується з метою перетворення групових помилок (пакетів помилок) в одиночні помилки, з якими легше боротись за допомогою блочного і згортаючого кодування.

Використання перемежування – одна із особливостей стільникового зв'язку. Це є наслідком неминучих глибоких завмирань сигналів в умовах багатопроменевого поширення. При цьому група наступних один за

одним символів, що попадають на інтервал завмирання (провалу) сигналу, з великою ймовірністю виявляється помилковою. Якщо перед передачею інформаційної послідовності в радіоканал вона піддається процедурі перемежування, а на приймальному боці відновлюється колишній порядок проходження символів, то пакети помилок з великою ймовірністю розбиваються на одиночні помилки. Відомо кілька різних схем перемежування та їхніх модифікацій:

- діагональна;
- блочна;
- згортаюча тощо.

В основі схем, що застосовуються в стільниковому зв'язку, лежать перші дві з них.

Канальне кодування в системі GSM використовує 260 біт, що надходять після мовного кодування, як вхідну величину, і перетворює їх в послідовність, що складається з 456 біт.

При цьому 260 біт інформації розподіляються згідно їхньої відносної важливості (рис. 13.4):

- блок 1: 50 біт - дуже важливі біти
- блок 2: 132 біт - важливі біти
- блок 3: 78 біт - не дуже важливі біти

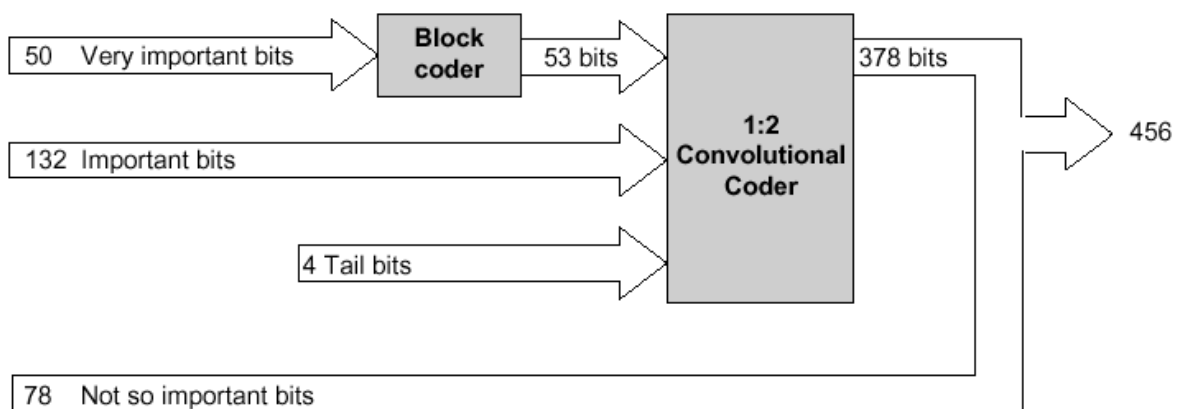


Рис. 13.4. Канальне та блочне кодування в GSM

Перший блок, що складається з 50 біт, передається через кодер (пристрій блочного кодування), який додає ще 3 біта для перевірки парності, отже, виходить послідовність з 53 бітів. Ці 3 біта призначаються для виявлення помилок в прийнятому повідомленні.

Після блочного кодування 53 біта першого блоку і 132 біта другого блоку плюс 4 хвостових біта (разом 189 біт) передаються до згортаючого кодера 1:2, на виході якого виходить 378 біт інформації. Додані біти при згортаючому кодуванні дозволяють виправляти помилки при прийомі повідомлень. Решта бітів третього блоку не захищені.

Слід зазначити, що каналний кодер здійснює кодування послідовностей з 456 бітів для кожних 20 мс мови. Після цього

здійснюється інтерлівінг, в результаті чого формується 8 блоків по 57 біт кожен (рис. 13.5).

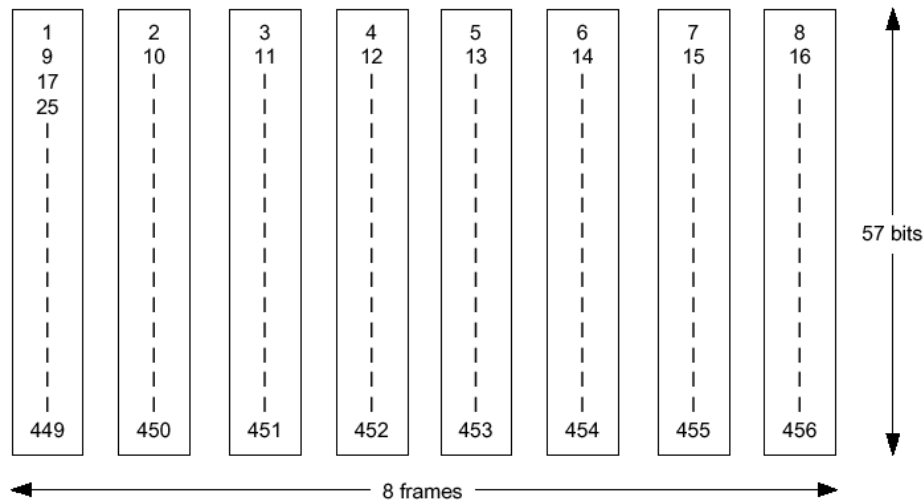


Рис.13.5. Інтерлівінг кодованої мови на інтервалі 20 мс

Як зображено на рис 13.6 в звичайному пакеті (*normal burst*) є місце для двох таких речових блоків (по 57 біт). Якщо один з цих блоків втрачається, це буде відповідати помилки 25% *BER* всередині інтервалу передачі мови тривалістю 20 мс ($2/8 = 25\%$).

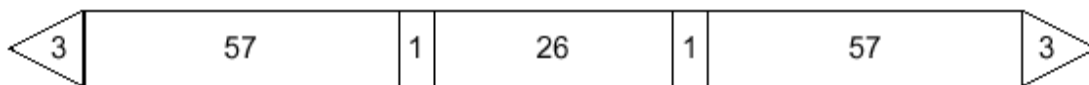


Рис.13.6. Звичайний пакет (*Normal burst*)

Це дуже велике значення помилки для здійснення коригування в каналному декодері приймача. Запровадження другого рівня інтерлівінга дозволяє знизити *BER* до 12.5%. При цьому замість передачі двох блоків по 57 біт мовного повідомлення для інтервалу 20 мс всередині одного пакета, система передає один блок інформації з одного 20 мілісекундного мовного повідомлення і один блок інформації з іншого 20 мілісекундного мовного повідомлення.

13.4. Модуляція

Функція модулятора полягає в переносі інформації цифрового сигналу з виходу кодера каналу на несучу частоту, тобто в модуляції надвисокочастотної (НВЧ) несучої низькочастотним (НЧ) цифровим відеосигналом. Модульований НВЧ сигнал з виходу модулятора через антенний комутатор надходить на антену і випромінюється в ефір. Відповідно завдання демодулятора полягає у виділенні з прийнятого

модульованого радіосигналу інформаційного відеосигналу, що піддається цифровій обробці в приймальному тракті.

В стандарті GSM використовується гаусівська маніпуляція з мінімальним зсувом (GMSK), при якій несуча частота дискретно через інтервали часу, кратні періоду T бітової послідовності, що модулює, приймає значення $f_H=f_0-F/4$ або $f_S=f_0+F/4$ де f_0 - центральна частота використовуваного частотного каналу; $F=1/T$ - частота бітової послідовності.

Рознос частот $\Delta f=f_S-f_H=F/2$ - мінімально можливий, при якому забезпечується ортогональність коливань частот f_H і f_S на інтервалі T тривалості одного біта; при цьому за час T між коливаннями частот f_H і f_S набігає різниця фаз, яка дорівнює π . Таким чином, термін «мінімальний зсув» у назві методу модуляції відноситься до зсуву частоти. Оскільки модулююча частота у цьому випадку дорівнює $F/2$, а девіація частоти $F/4$, індекс частотної модуляції складає $m=(F/4)/(F/2)=0,5$.

Термін «гаусівська» у назві методу модуляції відповідає додатковій фільтрації бітової модулюючої послідовності відносно вузькосмуговим гаусівським фільтром; саме ця додаткова фільтрація відрізняє метод GMSK від методу MSK (маніпуляція з мінімальним зсувом). Метод MSK іноді розглядають як метод квадратурної фазової маніпуляції зі зсувом (OQPSK), але з заміною прямокутних модулюючих імпульсів тривалістю $2T$ напівхвильовими відрізками синусоїд або косинусоїд. В методі MSK вхідна послідовність бітових імпульсів модулятора розбивається на дві послідовності, що складаються з непарних і парних імпульсів, і модульований сигнал (вихідний сигнал модулятора) протягом чергового n -го біта визначається виразом, що залежить від стану поточного n -го і попереднього $(n-1)$ -го біта.

Методи модуляції $\pi/4$ DQPSK і GMSK є однаковими по частоті бітової помилки, хоча перший з них забезпечує більш високу ефективність використання смуги частот у розрахунку на 1 біт переданої інформації.

14. Мобільна станція

Мобільна станція (англ. *MS - Mobile Station*) використовується абонентом для доступу до стільникової мережі і складається з двох незалежних частин:

- мобільного обладнання (*ME - Mobile Equipment*);
- модуля ідентифікації абонента (*SIM*).

Існує кілька класів мобільних станцій, які відрізняються один від одного потужністю передавача, розмірами та можливостями взаємодії з пристроями передачі даних.

14.1. Класи мобільних (абонентських) станцій.

Мобільні станції відрізняються одна від одної як функціями, основними і додатковими, так і електричними параметрами, тобто, перш за все, максимальною потужністю рівня передачі, що впливає на розміри станції, та час роботи акумуляторів.

Класи мобільних станцій визначено в залежності від максимальної потужності передавача (табл. 14.1). Історично найстарішими і найважчими були возимі станції, призначені для монтування в автомобілях з антеною, яка монтується ззовні автомобіля. Наступним етапом в еволюції мобільних станцій були переносні моделі. Відносно висока потужність перевізних і переносних станцій привела до того, що вони використовуються і зараз, а саме там, де місцевість покрита великими комірками (напр. сільська місцевість). Переносні станції можуть бути також пристосовані до монтажу в автомобілях. Найбільш популярною генерацією мобільних станцій є кишенькові станції. Кінцевим обладнанням системи *GSM* може бути також безпроводний телефонний автомат та безпроводна комутаційна станція (використовується, напр., на кораблях, в поїздах і т.п.). Мобільні станції крім передачі розмови можуть також використовуватися для інших цілей, наприклад для передачі результатів вимірювань, сигналізації тощо.

Класи мобільних станцій в системах *GSM 900* і *DCS 1800*

Таблиця 14.1.

№	<i>GSM 900</i>		<i>DCS 1800</i>	
	Потужність передавача	Типи станцій	Потужність передавача	Типи станцій
1	20 Вт (43 дБм)	возимі та переносні	1 Вт (30 дБм)	кишенькові
2	8 Вт (39 дБм)	возимі та переносні	0,25 Вт (24 дБм)	кишенькові
3	5 Вт (37 дБм)	кишенькові	4 Вт (36 дБм)	кишенькові
4	2 Вт (33 дБм)	кишенькові	---	---
5	0,8 Вт (29 дБм)	кишенькові	---	---

Практично в даний час мобільні термінали випускаються тільки з вихідною потужністю до 2 Вт в діапазоні GSM 900 і до 1 Вт в діапазоні GSM 1800.

Важливим застосуванням терміналів системи GSM є передача даних, тобто сигналів з комп'ютерних модемів і телефаксу. З точки зору пристосовування до передачі даних, термінали системи GSM поділяються на три типи, в залежності від місця встановлення модуля, що реалізує адаптивні функції TAF (англ. *Terminal Adaptation Functions*), які необхідні для передачі даних:

–MT0 (англ. *Mobile Terminal type 0*) – це найпростіший випадок, у якому як функції зовнішнього пристрою, так і адаптивні функції інтегровані в одному пристрої. Термінали MT0 існують тільки для передачі мови;

–MT1 (англ. *Mobile Terminal type 1*) – це варіант, якому термінал, який має ISDN-інтерфейс «S». До нього можуть бути під'єднані будь-які зовнішні пристрої ISDN. Зовнішні пристрої, що мають модемний інтерфейс, можуть взаємодіяти з терміналом MT1 через ISDN-адаптер терміналу TA (англ. *Terminal Adapter*) – в цьому випадку адаптивні функції розподіляються між MT1 і TA;

–MT2 (англ. *Mobile Terminal type 2*) – це варіант, в якому адаптивні функції TAF повністю інтегровані з терміналом і взаємодіють із зовнішнім пристроєм через класичний модемний інтерфейс.

14.2. Функції та архітектура мобільної станції.

Функціональна схема мобільної станції GSM відповідає окремим етапам перетворення сигналу, що передається від мікрофону аж до моменту генерації сигналу на радіочастоті (рис. 14.1) Абонентську станцію можна умовно поділити на дві частини: аналогову (фільтри, підсилювачі, конвертори частоти, модулятор/демодулятор, синтезатор частоти з ФАПЧ тощо) та цифрову (кодери/декодери мови та каналу, модулі адаптації стиків, пристрій керування тощо). Інтерфейс користувача складається з клавіатури, мікрофону і навушника та дисплея, необхідного, між іншим, для передачі коротких текстових повідомлень.

Мобільні станції виконують наступні основні функції:

- ОБРОБКА ПРИЙНЯТИХ І ПЕРЕДАНИХ СИГНАЛІВ – АЦП, кодування мови, каналне кодування, модуляція (та зворотні функції на приймальній стороні);
- ДОПОМІЖНІ ФУНКЦІЇ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ТРАНСМІСІЄЮ – скакання по частотах регулювання потужності, вимірювання якості прийнятого сигналу (вимірювання ймовірності помилок) від власної «базової» станції, вимірювання потужності прийнятих сигналів від «власної» і сусідніх базових станцій;

- ФУНКЦІЇ ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА – дозволяють користувачу зв'язатися із системою, використовуючи мобільну станцію;
- ФУНКЦІЇ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ПЕРЕДАЧЕЮ ДАНИХ, ТОБТО АДАПТИВНІ ФУНКЦІЇ, ТА ФУНКЦІЇ, ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ СПОСОБОМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З АВТОМАТИЧНОЮ РЕТРАНСЛЯЦІЄЮ ПОМИЛКОВИХ ПАКЕТІВ ARQ (англ. *Automatic Repeatre Quest*).

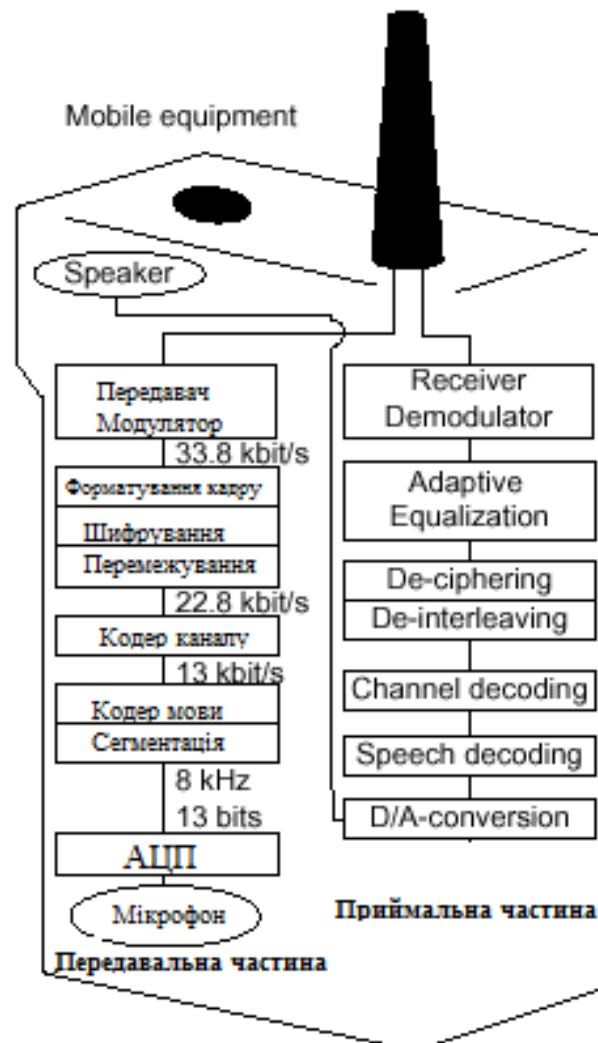


Рис. 14.1. Спрощена функціональна схема мобільного обладнання

В системі GSM мобільна станція була стандартизована тільки частково. Не стандартизований, наприклад, інтерфейс людина-машина. Отже стандарт закінчується «всередині» мобільної станції, між радіоінтерфейсом і користувачем. Виробникам надано певну свободу в проектуванні мобільних станцій, але діюча мобільна станція не може вносити завади в роботу інших систем та повинна виконувати вимоги щодо зовнішніх параметрів.

Мобільну станцію спроектовано, як інтелектуальний термінал. Вона виконує, звичайно, ряд локальних функцій (англ. *Local feates*), виконання

яких не вимагає співпраці з мережею. Тільки частина з них належить до мінімальної групи основних функцій, які повинен виконувати кожний термінал. Крім того, виробники можуть надати їй функції, які не вимагаються в стандарті GSM. Група основних функцій робить одноманітними і спрощує користування терміналами незалежно від його типу і виробника. Важливою причиною, що виправдовує необхідність об'єднання групи основних функцій, є присутність стандартного-модуля SIM. Функції, які необхідні для правильної роботи модуля SIM, повинні знаходитись в кожній рухомій станції.

До групи основних локальних функцій належать такі функції: відображення набраного номеру та інформації про систему GSM (країна+оператор), можливість вибору оператора в даній країні, можливість міжнародного ідентифікаційного номеру IMEI. Важливими функціями, які не є основними, є функції, що пов'язані з обслуговуванням коротких текстових повідомлень, тобто сигналізування отримання повідомлення та сигналізування переповнення пам'яті короткими повідомленнями. Інші функції не є обов'язковими. Це, наприклад, виконання мобільною станцією функції інтерфейсу ISDN, скорочений вибір, можливість встановлення з'єднань тільки до деяких номерів, повтор останнього номеру, блокування вихідних з'єднань чи висвітлення нарахування оплати і т.п.

Виміри, що проводяться MS, полягають в оцінці рівня сигналу БС стільника, що обслуговує та сусідніх стільників з подальшим прийняттям рішення на «хендоверне» перемикання. MS може знаходитися в двох основних режимах: *IDLE*(вільний режим) та *ACTIVE*.

14.3. Основні параметри станції

В зв'язку з тим, що кількість мобільних станцій та інших електронних пристроїв, які мають доступ до радіоканалу, може бути дуже великою, необхідним є дуже старанний нагляд за електричними параметрами випромінюваного сигналу. Нижче описано кілька найважливіших вимог, які стосуються параметрів випромінюваного сигналу в радіоканал.

• **ПОТУЖНІСТЬ ПЕРЕДАВАЧА.** В таблиці 14.1 представлено класи мобільних станцій систем GSM-900 та DCS-1800 з точки зору максимальної потужності передавача мобільної станції. З іншого боку, дуже важливо, щоб не передавати потужності більшої, ніж необхідно для якісної передачі. Дуже високий рівень сигналу передачі мобільної станції збільшує рівень інтерференції в сусідніх каналах і скорочує термін дії батарей. В системі GSM застосовано механізм управління потужністю (англ. *power control*). По команді базової станції мобільна станція повинна мати можливість регулювання рівня сигналу передачі від максимального рівня для свого класу з кроком 2 dB до мінімального рівня +13dBm (20 мВт). Це дозволяє динамічно регулювати потужність сигналу передачі в залежності від відстані між мобільною та базовою

станціями. Побічним ефектом регулювання потужності мобільної станції є небажане випромінювання в сусідніх радіоканалах на частоті, вищій від несучої на 400 кГц. З метою максимального обмеження інтерференції між рухомими станціями, які працюють в одному стільнику, специфікація GSM обмежує максимальну величину небажаного випромінювання в діапазоні прийому мобільної станції GSM (канал «вниз» - 935...960 МГц): для мобільних станцій першого класу -76 dBm і -84 dBm для інших класів. Важливим показником для досліджень шкідливого впливу мобільного телефону на людину є **SAR** (*Specific absorption rate*) - питомий коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії - показник, який визначає енергію електромагнітного поля, що поглинається в тканинах тіла людини за 1 сек. Одиниця виміру SAR - Вт/кг. Допустиме випромінювання в Європі - не більше 2 Вт/кг, в Америці - не більше 1,6 Вт/кг.

- **НЕБАЖАНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОЗА ДІАПАЗОНОМ.** Крім описаних вище обмежень, що стосуються максимальних рівнів небажаних сигналів, генерованих в діапазоні GSM, стандарт GSM об'єднує також обмеження на потужність небажаних сигналів на частотах, що лежать поза діапазоном GSM. Метою обмежень є уникнення інтерференції з електронним обладнанням, діючим в інших діапазонах частот. Обмеження стосуються максимальної величини потужності небажаного сигналу в діапазоні частот від 9 кГц до 12,75 ГГц. Ці величини становлять: -36 dBm для діапазону від 9 кГц до 1 ГГц (за винятком діапазону GSM) і -30 dBm для діапазону від 1 ГГц до 12,75 ГГц.

- **СТАБІЛЬНІСТЬ ЧАСТОТИ.** Базова станція підстроює частоти мобільної станції на основі свого дуже точного еталону. Висока стабільність частоти в передавачах базових станцій (не менше $5 \cdot 10^{-8}$) дозволяє застосувати відносно дешеві кварцові генератори в мобільних станціях (їх стабільність приблизно рівна $3 \cdot 10^{-6}$).

- **ТОЧНІСТЬ МОДУЛЯЦІЇ.** В системі GSM застосовано модуляцію GMSK з параметром $BT=0,3$. Постійна огинаюча сигналу GMSK дозволяє застосовувати в мобільних станціях високопродуктивні нелінійні підсилювачі класу C. З метою забезпечення ефективного використання діапазону частот в стандарті GSM введено досить жорсткі вимоги щодо точності модуляції. Максимальне відхилення несучої частоти становить 90 Гц, а середньоквадратична величина шуму фази не може перевищувати 5%.

- **ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН.** Мінімальні межі регулювання вхідного ВЧ сигналу приймача мобільної станції становлять 94 dB (92dB для кишенькових терміналів), що дозволяє мобільній станції приймати сигнали на відрізку від -10 до -104 dBm (до -102 dBm для кишенькових терміналів). Фактично нижнє значення цього діапазону є порогом чутливості приймача

- **ЖИВЛЕННЯ.** Живлення мобільних станцій є важливими параметром саме тоді, коли беремо до уваги прагнення створити щоразу менші і легші термінали, в яких часто містяться акумулятори все менше

ємності. З іншого боку, конструктори мобільних станцій прагнуть забезпечити своїм виробам хоча б 8-годинний «робочий день». В цій ситуації широко використовуються елементи *CMOS*, бо мають малу споживану потужність. Шансом створення більш економічних терміналів є розвиток напівпровідникових технологій, тобто створення елементів, що потребуватимуть менших напруг живлення. Основним обмеженням в цьому випадку є, однак, аналогова радіочастина, яка потребує певної потужності для передачі сигналу в радіоканалі.

14.4. Динамічне регулювання потужністю мобільної станції

Процедури керування потужністю (англ. *power control*) дає можливість динамічно підстроювати потужність сигналу, який передається в радіоканалі, на відстань між передавачем і приймачем, що змінюється. Це відбувається за допомогою зміни рівня сигналу передачі, наприклад, мобільною станцією, в певних межах так, щоб в даний момент для даної довжини з'єднання і даного рівня спотворень в каналі це був найменший рівень, необхідний для одержання відповідної якості сигналу. Метою цієї процедури є зменшення інтерференції між фізичними каналами, що працюють на тій самій частоті в сусідніх комірках, а також на сусідніх частотах, та зменшити енергоспоживання мобільної станції.

Можливі різні алгоритми регулювання потужності *MS* і *BTS*. Вибір і реалізація того чи іншого алгоритму залежить від виробника устаткування та оператора *GSM* мережі, однак стандартом *GSM* визначено види вимірювань, які повинні виконувати *MS* і *BTS* для підтримки регулювання потужності, і формати повідомлень, якими вони обмінюються. Оператор системи вирішує, чи використовувати цю процедуру в обох напрямках, чи тільки в одному.

В обох напрямках передачі регулювання рівня потужності відбувається по крокам. Максимальна швидкість змін становить 2 dB протягом 60 мс в межах 30 dB до мінімального вихідного рівня 13 dBm . Регулювання рівня потужності, яке виникає зі зміни величини затухання у вільному просторі (що є наслідком змін відстані від передавача до приймача) є відносно повільним.

На рисунку 14.2 представлено приклад регулювання потужності передавача мобільної станції з класом потужності №2 при переході з великого стільника в малий. Мобільна станція, що знаходиться на краю великого стільника, передає з максимальною потужністю. Після переходу в менший стільник різко зменшується відстань між мобільною станцією і базовою, виникає необхідність зменшення рівня потужності мобільної станції. Потужність мобільної станції регулюється від максимальної величини (для класу №2 - 8 Вт (39 dBm)) до мінімальної $0,02\text{ Вт}$ (13 dBm). Регулювання потужності в обох напрямках відбувається незалежно один від одного. Подібно незалежно відбувається керування потужністю всіх мобільних станцій, що знаходяться у даному стільнику.

Процедура керування потужністю вимагає від мобільної і базової станцій виконання вимірювань якості радіоканалу під час тривання з'єднання. Базова станція вимірює рівень потужності і рівень помилок прийнятого сигналу від даної мобільної станції, а мобільна станція вимірює рівень потужності прийнятого сигналу з базової станції. На основі цього блок керування базової станції видає команди уточнення рівня вихідного сигналу обох передавачів.

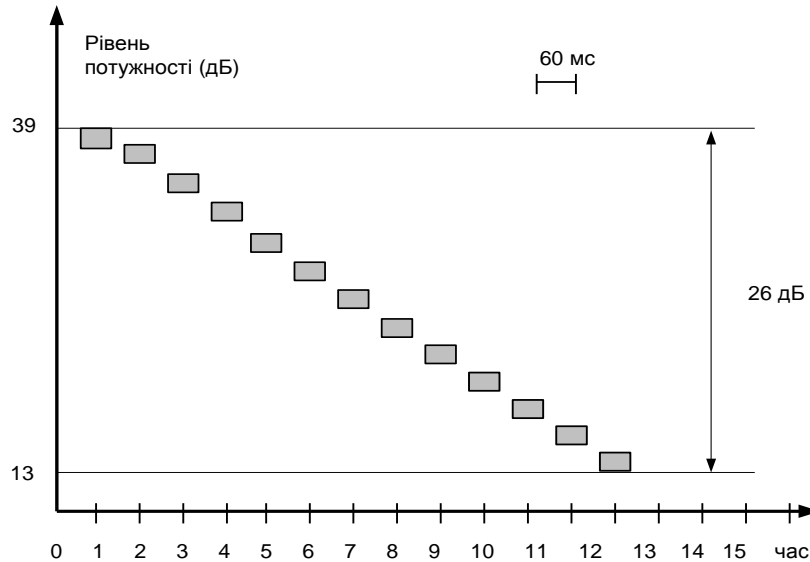


Рис. 14.2. Приклад керування потужністю MS другого класу

В перший момент появи мобільної станції в даному стільнику або появи вимоги доступу, мобільна станція передає з так званим „вступним” рівнем потужності (англ. *initial power level*). Величина вступного рівня потужності для даного стільника передається в каналі *BCCH*. Мобільна станція, максимальний рівень потужності якої лежить нижче вступного рівня, передає зі своєю максимальною потужністю.

У *GSM* мережах використовують адаптивне регулювання потужності не тільки *MS*, а й *BTS*. Регулювання потужності *BTS* проводять на основі результатів вимірювань, які виконуються *MS* і повідомляються мережі в повідомленнях *Channel Quality Report*.

15. Інформаційна безпека в системах стільникового зв'язку

15.1. Загальна характеристика безпеки зв'язку

Стільникові системи мобільного зв'язку нового покоління можуть обслужити всіх потенційних користувачів, якщо буде гарантована безпека переданої інформації.

В стандарті *GSM* під терміном “**безпека**” розуміється *виключення несанкціонованого використання ресурсу системи і забезпечення конфіденційності переговорів мобільних абонентів*. Визначено наступні механізми безпеки в стандарті *GSM*:

- автентифікація;
- конфіденційність передачі даних;
- конфіденційність абонента;
- конфіденційність напрямків з'єднання абонентів.

Шифрування сигналів керування і даних користувача здійснюється *тільки в радіоканалі*.

Режими безпеки в стандарті *GSM* визначаються рекомендаціями, наведеними в табл. 15.1.

Рекомендації по забезпеченню інформаційної безпеки у мережах *GSM*

Таблиця 15.1

<i>GSM 02.09</i>	Аспекти конфіденційності	Визначає характеристики безпеки, які застосовуються в мережах <i>GSM</i> . Регламентується їхнє застосування в мобільних станціях і мережах.
<i>GSM 03.20</i>	Конфіденційність, яка пов'язана з функціями мережі	Визначає функції, необхідні для забезпечення характеристик безпеки, розглянутих у Рекомендаціях <i>GSM 02.09</i>
<i>GSM 03.21</i>	Алгоритми забезпечення конфіденційності	Визначає криптологічні алгоритми в системі зв'язку
<i>GSM 02.17</i>	Модулі дійсності абонентів (<i>SIM</i>)	Визначає основні характеристики модуля <i>SIM</i>

Далі розглянемо механізми безпеки в стандарті *GSM*, загальний склад конфіденційної (що захищається) інформації, а також її розподіл в апаратних засобах *GSM*-системи. При цьому будемо використовувати терміни й позначення, прийняті в Рекомендаціях *GSM*.

15.2. Автентифікація та шифрування даних.

Механізми автентифікації

Для виключення несанкціонованого використання ресурсів системи у стандарті *GSM* реалізуються механізми автентифікації – перевірки дійсності абонента.

Кожний мобільний абонент на час користування системою зв'язку одержує стандартний модуль дійсності абонента (*SIM*-карту), що містить:

- міжнародний ідентифікаційний номер мобільного абонента (*IMSI*);
- індивідуальний ключ автентифікації (K_i) довжиною 128 біт;
- алгоритм автентифікації (**A3**);
- алгоритм визначення ключа шифрування (**A8**).

За допомогою закладеної в *SIM* інформації в результаті взаємного обміну даними між мобільною станцією і мережею здійснюється повний цикл автентифікації і дозволяється доступ абонента до мережі.

Процедура перевірки мережею дійсності абонента реалізується наступним чином. По запиту ЦКМС (*MSC*) центр автентифікації (*AUC*) генерує так званий триплет: *RAND*, *SRES* та K_c (рис. 15.1). Генерується, як правило, декілька триплетів автентифікації, які у вигляді таблиці зберігаються в *AUC* і партіями передаються в *HLR*.

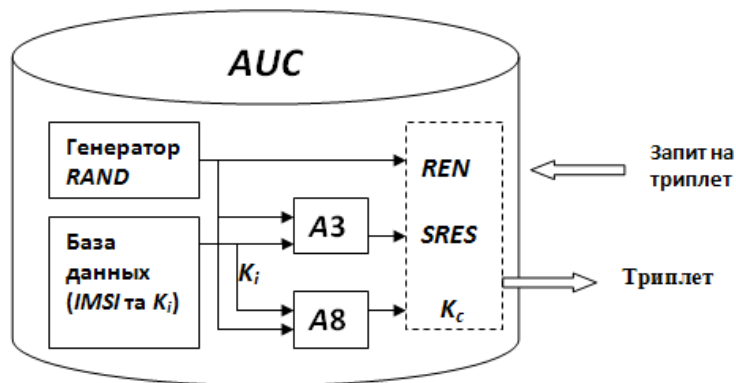


Рис. 15.1. Формування триплету в *AUC*

Мережа передає випадковий номер *RAND* (випадкове число від 0 до $(2^{128}-1)$) довжиною 128 біт на мобільну станцію. Мобільна станція визначає значення відгуку *SRES* (*Signed RESult* – підписаний результат), використовуючи *RAND*, K_i і алгоритм **A3** (рис. 15.2):

$$SRES = K_i [RAND]_{A3}$$

Мобільна станція посилає обчислене значення *SRES* довжиною 32 біт у мережу, яка звіряє значення прийнятого *SRES* зі значенням *SRES*, обчисленим мережею. В мережі ключі ідентифікації зберігаються в центрі автентифікації (*AUC*). Якщо обидва значення співпадають, то мобільна станція зможе здійснювати передачу повідомлень. У іншому випадку зв'язок перерветься, і індикатор мобільної станції покаже, що впізнання не відбулося.

Для того, щоб досягти необхідного рівня безпеки, алгоритм A3 повинен бути однонаправленою функцією. Це означає, що обчислення SRES при відомих K_i і RAND повинне бути простим, а зворотна дія - обчислення K_i при відомих RAND і SRES - повинне бути максимально складним. Значення, яке обчислюється по алгоритму A3, має довжину 32 біти. K_i може мати будь-який формат і довжину. В інтересах організації безпеки обчислення SRES відбувається в рамках SIM-карти.

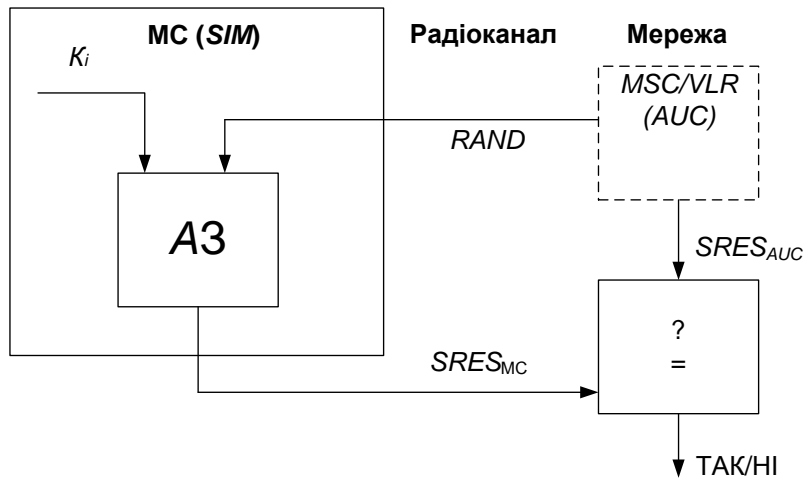


Рис. 15.2. Процедура автентифікації

Відомо декілька стандартних реалізацій алгоритму A3: *comp 128*, *comp 128-2*, *comp 128-3*, *MILENAGE* (розроблений 3GPP).

Різні оператори стільникового зв'язку використовують різні процедури автентифікації:

- при кожній реєстрації абонента;
- при кожній спробі встановлення з'єднання;
- при оновленні місцеположення;
- перед активізацією або скасуванням додаткових послуг.

Конфіденційність передачі даних.

Ключ шифрування.

Шифрування сигналів, які передаються в мережі, здійснюється тільки в радіоканалі. Для цього вводиться наступний механізм захисту.

Після прийому випадкового номера RAND мобільна станція обчислює, крім відгуку SRES, також і сесійний ключ шифрування (K_c), використовуючи RAND, K_i і алгоритм A8 (рис. 15.3):

$$K_c = K_i [RAND]_{A8}$$

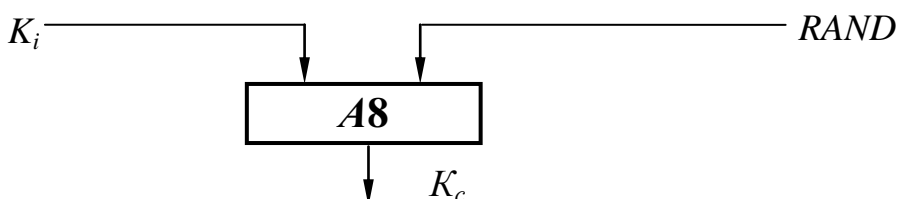


Рис. 15.3. Процедура обчислення ключа шифрування

Довжина ключа шифрування складає 64 біта, він не передається по радіоканалу і в інтересах безпеки обчислюється в *SIM*-карті. Крім того, ключ шифрування обчислює і мережа.

Крім випадкового числа (*RAND*) мережа посилає на мобільну станцію номер числової послідовності ключа шифрування (*CKSN*). Це число (від 0 до 2715647, яке змінюється кожні 3,5 години) пов'язане з дійсним значенням K_c і дозволяє уникнути формування помилкового ключа. Число зберігається мобільною станцією та міститься в кожному першому повідомленні, яке передається в мережу.

Установка режиму шифрування.

Для включення режиму шифрування мережа передає мобільній станції команду **СМС** (*Ciphering Mode Command*) на перехід у режим шифрування. Після одержання команди **СМС** мобільна станція, використовуючи наявний у неї ключ, приступає до шифрування й дешифрування повідомлень. Потік переданих даних шифрується біт за бітом, тобто поточковим шифром, використовуючи алгоритм шифрування *A5* і сесійний ключ шифрування K_c . Процедура встановлення режиму шифрування показана на рис. 15.4.

Алгоритм *A5/x* має наступні модифікації:

- *A5/0*(передача даних без шифрування);
- *A5/1*(алгоритм підвищеної стійкості, має експортні обмеження),
- *A5/2*(експортний варіант *A5/1*, в якому криптостійкість була знижена);
- *A5/3*(модернізована 128-бітна версія *A5/1* із використанням алгоритму Касумі для мереж третього покоління).

Алгоритм *A5/x* заснований на побітовому додаванні по модулю два (булева операція **XOR**) генеруємої псевдовипадкової послідовності і шифруємої інформації. Псевдовипадкова послідовність реалізується на основі трьох лінійних регістрів зсуву із зворотним зв'язком. Регістри мають довжини 19, 22 і 23 біти, що дає в сумі 64 біта. Зсувом управляє спеціальна схема, яка організовує на кожному кроці зсув як мінімум двох регістрів, що приводить до їх нерівномірного руху. Послідовність формується шляхом складання по модулю два (булева операції **XOR**) вихідних бітів регістрів.

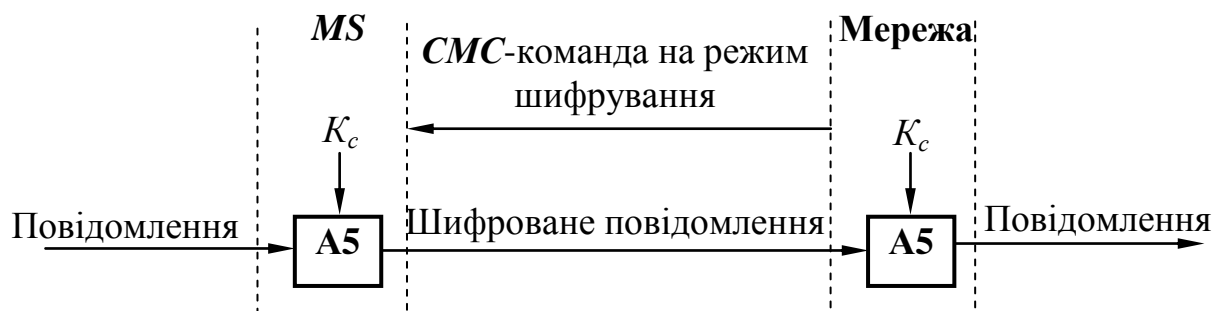


Рис. 15.4. Процедура установки режиму шифрування

Забезпечення конфіденційності абонента

Для виключення визначення (ідентифікації) абонента шляхом перехоплення повідомлень, переданих по радіоканалу, кожному абонентові системи зв'язку призначається *тимчасовий міжнародний ідентифікаційний номер користувача (TMSI)*, що дійсний тільки в межах конкретної зони місцезнаходження (*LA*), яку обслуговує відповідний реєстр *VLR*. В іншій зоні місцезнаходження йому призначається інший *TMSI*. Якщо абонентові ще не був призначений тимчасовий номер (наприклад, при першому включенні мобільної станції), ідентифікація проводиться через міжнародний ідентифікаційний номер (*IMSI*). Після закінчення процедури автентифікації і початку режиму шифрування тимчасовий ідентифікаційний номер (*TMSI*) передається на мобільну станцію тільки в зашифрованому вигляді. Цей *TMSI* буде використовуватися при всіх наступних доступах до системи.

Забезпечення конфіденційності абонента при корегуванні його місцезнаходження

При виконанні процедури корегування місцезнаходження по каналах керування здійснюється двосторонній обмін між мобільною (*MS*) і базовою (*BTS*) станціями службовими повідомленнями, які містять тимчасові номери абонентів *TMSI*. У цьому випадку в радіоканалі необхідно забезпечити захист інформації про перейменування *TMSI* і їхньої приналежності конкретному абоненту.

Розглянемо, як забезпечується конфіденційність у процедурі корегування місцезнаходження у випадку, коли абонент проводить сеанс зв'язку і при цьому переміщується з однієї зони в іншу.

У цьому випадку мобільна станція вже зареєстрована в режимі переміщення *VLR* з тимчасовим набором *TMSI*, який відповідає колишній зоні місцезнаходження. При вході в нову зону місцезнаходження здійснюється процедура розпізнавання, що проводиться по старому, зашифрованому в радіоканалі *TMSI*, переданому одночасно з найменуванням зони місцезнаходження (*LAI*). *LAI* надає інформацію центру комутації і центру керування про напрямок переміщення мобільної станції і дозволяє запросити колишню зону розташування про статус абонента і його дані, виключивши обмін цими службовими повідомленнями по радіоканалах керування. При цьому по каналу зв'язку повідомлення передається у вигляді зашифрованого інформаційного тексту із перериванням повідомлення в процесі "естафетної передачі" на 100 – 150 мс.

Процедура корегування місцезнаходження, що реалізує функцію конфіденційності абонента, показана на рис. 15.5.

Загальний склад конфіденційної інформації в мережах GSM і її розподіл в апаратних засобах

Відповідно до розглянутих механізмів безпеки, що діють у стандарті GSM, конфіденційною (що захищається) вважається наступна інформація:

RAND – випадкове число, яке використовується для автентифікації мобільного абонента;

SRES – значення відгуку – відповідь мобільної станції на отримане випадкове число;

K_i – індивідуальний ключ автентифікації користувача, який застосовується для обчислення значення відгуку і ключа шифрування;

K_C – сесійний ключ шифрування, який використовується для шифрування-дешифрування повідомлень, сигналів керування і даних користувача в радіоканалі;

A3 – алгоритм автентифікації, який застосовується для обчислення значення відгуку із випадкового числа з використанням ключа K_i ;

A8 – алгоритм формування ключа шифрування, який використовується для обчислення ключа K_C із випадкового числа з використанням ключа K_i ;

A5 – алгоритм шифрування/дешифрування повідомлень, сигналів керування і даних користувача з використанням ключа K_C ;

CKSN – номер ключової послідовності шифрування, який указує на дійсне число K_C , щоб уникнути застосування різних ключів на передавальній і приймальній сторонах;

TMSI – тимчасовий міжнародний ідентифікаційний номер користувача.

У таблиці 15.2 показаний розподіл конфіденційної інформації в апаратних засобах системи зв'язку GSM.

Розподіл конфіденційної інформації в апаратних засобах GSM

Таблиця 15.2

№ з/п	Апаратні засоби	Вид інформації
1.	Мобільна станція (без SIM)	A5
2.	Модуль дійсності абонента (SIM)	A3; A8; IMSI; K_i ; TMSI / LAI; K_C /CKSN
3.	Центр автентифікації (AUC)	A3; A8; IMSI / K_i
4.	Регістр місцезнаходження (HLR)	Групи IMSI/RAND/SRES/ K_C
5.	Регістр переміщення (VLR)	Групи IMSI/RAND/SRES/ K_C , IMSI/TMSI/LAI/ K_C /CKSN
6.	Центр комутації (MSC)	A5; TMSI/IMSI/ K_C
7.	Контролер базової станції (BSC)	A5; TMSI/IMSI/ K_C

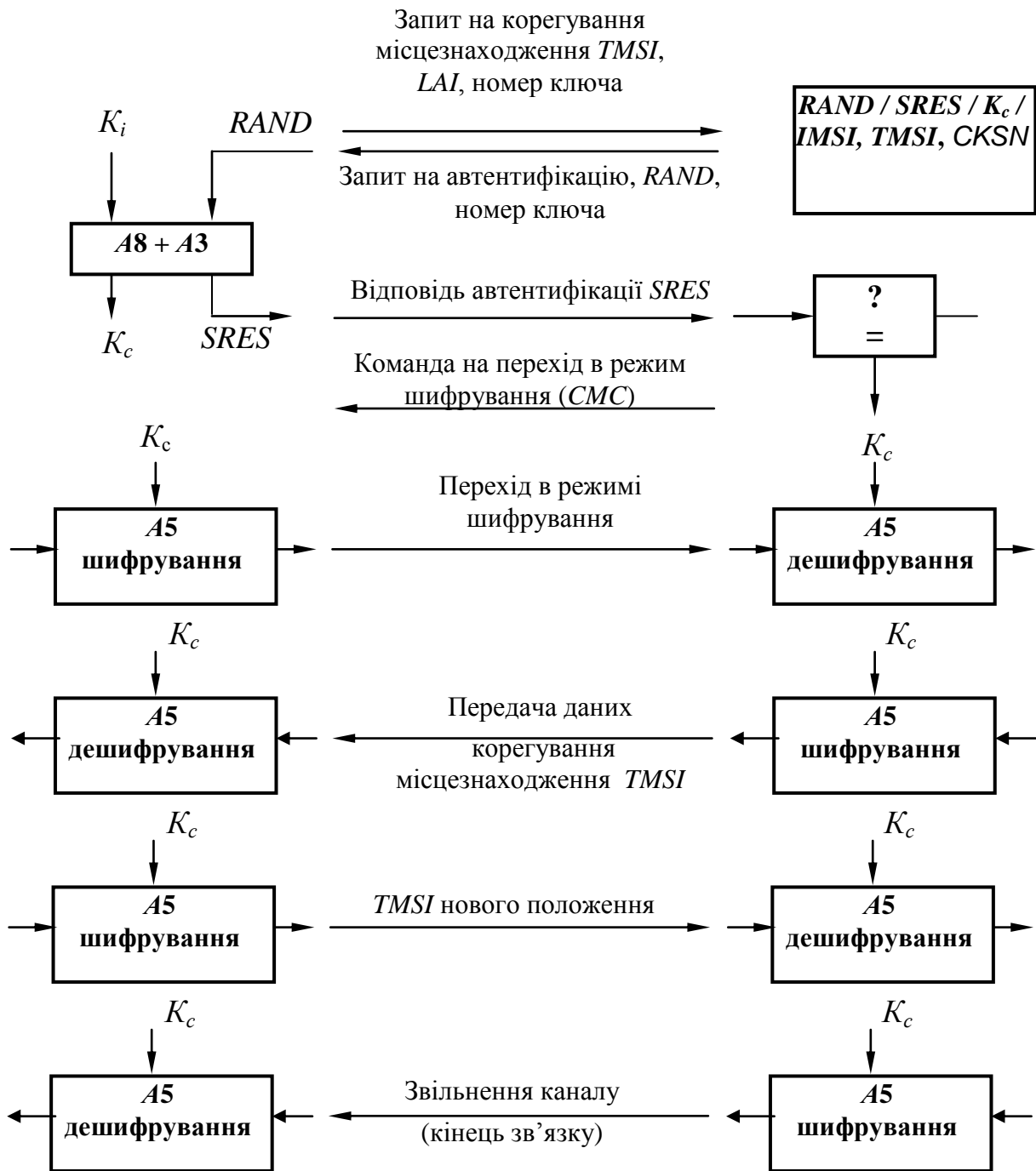


Рис. 15.5. Процедура корегування місцезнаходження

Організація безпеки при обміні повідомленнями між *HLR*, *VLR* і *MSC*

Основним об'єктом, який відповідає за всі аспекти безпеки, є центр автентифікації (*AUC*). Цей центр може бути окремим об'єктом або входити до складу якого-небудь устаткування, наприклад до реєстру місцезнаходження (*HLR*).

AUC вирішує наступні завдання:

- формування індивідуальних ключів автентифікації користувачів (K_i) і відповідних їм міжнародних ідентифікаційних номерів абонентів (*IMSI*);
- формування набору $RAND / SRES / K_C$ для кожного *IMSI* і розкриття при необхідності цих груп для *HLR*.

Якщо мобільна станція переходить у нову зону розташування, новий *VLR* повинен одержати інформацію про цю мобільну станцію. Це може бути забезпечено наступними двома способами:

- мобільна станція проводить процедуру ідентифікації по своєму міжнародному номеру (*IMSI*). При цьому *VLR* запитує у реєстра місцезнаходження (*HLR*) групи даних $RAND/SRES/K_C$, що належать до даного *IMSI*.

- мобільна станція проводить процедуру автентифікації, використовуючи колишній тимчасовий номер *TMSI* з найменуванням зони розташування *LA*. Новий *VLR* запитує колишній *VLR* для посилки міжнародного номера *IMSI* і груп, що залишилися, з $RAND/SRES/K_C$, які належать до цих *TMSI/LA*.

Якщо мобільний абонент залишається на більш тривалий період в *VLR*, то після декількох доступів з автентифікацією з міркувань забезпечення інформаційної безпеки *VLR* зажадає нові групи $RAND/SRES/K_C$ від *HLR*.

Всі ці процедури визначені в Рекомендації *GSM 09.02*.

Перевірка автентифікації виконується в *VLR*, який посилає $RAND$ на комутаційний центр (*MSC*) і приймає відповідні відгуки *SRES*. Після позитивної автентифікації *TMSI* розміщується з *IMSI*. *TMSI* і ключ шифрування K_C , який використовується, посилають у центр комутації (*MSC*). Ці ж процедури визначаються в Рекомендації *GSM 09.02*. Передача конфіденційної (що захищається) інформації по радіоканалу визначена в Рекомендації *GSM 04.08*.

15.3. Модуль відповідності абонента

Введення режиму шифрування в стандарті *GSM* висуває особливі вимоги до мобільних станцій. Зокрема, індивідуальний ключ автентифікації користувача K_i , пов'язаний з міжнародним ідентифікаційним номером абонента (*IMSI*), вимагає високого ступеня захисту. Він також використовується в процедурі автентифікації.

Модуль відповідності абонента *SIM* містить повний обсяг інформації про конкретного абонента. *SIM* реалізується конструктивно у вигляді картки з вбудованою електронною схемою. Введення *SIM* робить мобільну станцію універсальною, тому що будь-який абонент, який використовує свою особисту *SIM* - карту, може забезпечити доступ до мережі *GSM* через будь-яку мобільну станцію.

Несанкціоноване використання *SIM* виключається введенням в *SIM* індивідуального ідентифікаційного номера (*PIN*), який призначається користувачеві при одержанні дозволу на роботу в системі зв'язку і реєстрації його індивідуального абонентського пристрою.

Основні характеристики модуля *SIM* визначені в Рекомендації GSM 02.17. Склад конфіденційної інформації, яка розміщується в *SIM* - карті, показаний в таблиці 15.2.

SIM – карта представляє собою пластикову карту розміром 15x25 мм із вбудованою мікросхемою, яка містить (рис.15.6):

- процесор (*CPU*);
- систему вводу/виводу інформації (*I/O*);
- постійну енергонезалежну пам'ять (*ROM*) – для збереження операційної системи карти, алгоритмів автентифікації;
- оперативну пам'ять (*RAM*) – для проведення обчислювальних операцій;
- перезаписувану пам'ять (*EEPROM*) – для збереження спеціальних даних або алгоритмів виробника карт, індивідуальних параметрів, які записуються при персоналізації карти і необхідні для роботи в мережі, особистої інформації абонента.

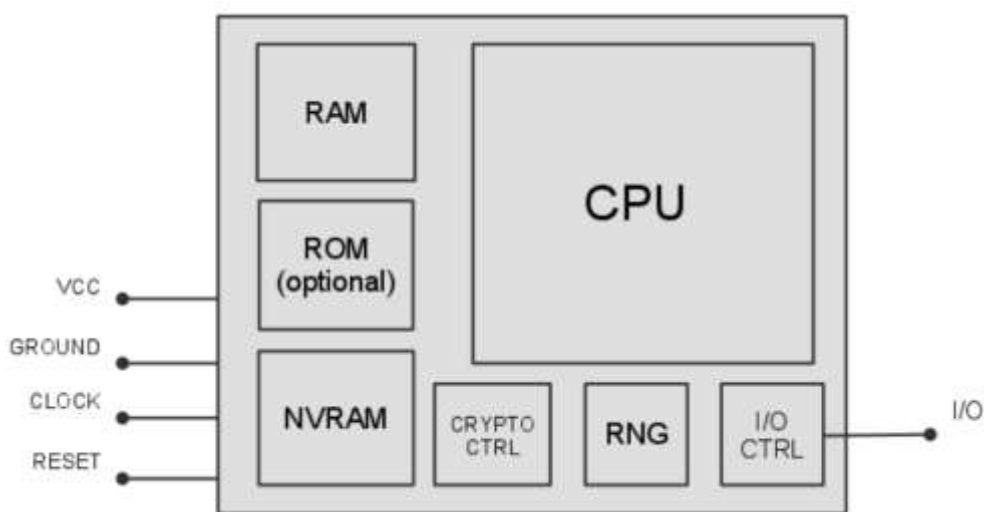


Рис.15.6. Структура *SIM*-карти

У відповідності з міжнародним стандартом ISO/IEC 7812 кожній *SIM*-карті присвоюється унікальний номер **ICCID** (**Integrated Circuit Card ID**), який складається з 19 цифр:

- 2 цифри — **Major Industry Identifier** (ідентифікатор індустрії, для телекомунікацій завжди **89**);
- 1-3 цифри — **Country Code** – телефонний код країни (відповідно до рекомендації E.164, для України – **380**);
- 2-4 цифри — **MNC** - код оператора;
- 11 цифр — індивідуальний номер карти, який визначається оператором при виробництві карти по внутрішнім правилам;

- 1 цифра (остання) — контрольна цифра, яка обчислюється по алгоритму Луна.

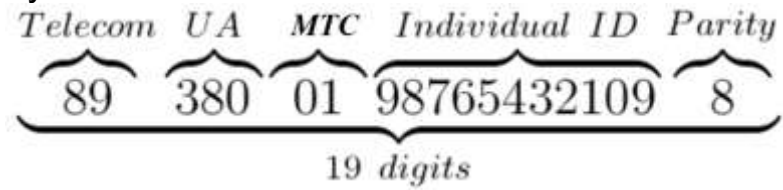


Рис.15.7. Структура ICCID

На закінчення необхідно відзначити, що обрані в стандарті *GSM* механізми забезпечення інформаційної безпеки і методи їхньої реалізації визначили основні елементи інформаційних блоків, що передаються, і напрямки передачі, на яких повинне здійснюватися шифрування (*RAND/SRES/K_C* від *HLR* до *VLR*; *RAND* і *SRES* – у радіоканалі). Для забезпечення інформаційної безпеки в стандарті *GSM* вирішені питання мінімізації часу з'єднання абонентів. При організації систем мобільного радіозв'язку по стандарту *GSM* є деяка свобода в застосуванні аспектів безпеки. Зокрема, не стандартизовані питання використання центру автентифікації *AUC* (інтерфейс із мережею, структурне розміщення *AUC* в апаратних засобах). Немає жорстких рекомендацій на формування закритих груп користувачів і системи пріоритетів, прийнятих в *GSM*. У зв'язку з цим в кожній системі зв'язку, що застосовує стандарт *GSM*, ці питання вирішуються самостійно.

16. Процес обслуговування виклику

16.1. Алгоритми функціонування систем стільникового зв'язку

Алгоритми функціонування систем стільникового зв'язку (ССЗ) різних стандартів в основному схожі. Коли радіотелефон знаходиться в режимі чекання, його приймальний пристрій постійно сканує або всі канали системи, або тільки канали керування. Для виклику абонента всіма базовими станціями (БС) стільникової системи зв'язку по каналах керування (КК) передається сигнал виклику. Мобільний телефон абонента при одержанні цього сигналу відповідає по одному з вільних КК. БС, що прийняли відповідний сигнал, передають інформацію про його параметри в центр комутації (ЦК), що переключає розмову на ту БС, де зафіксований максимальний рівень сигналу радіотелефону цього абонента.

Під час набору номера радіотелефон займає один із вільних каналів, рівень сигналу БС у якому в даний момент максимальний. При видаленні абонента від БС або в зв'язку з погіршенням умов поширення радіохвиль рівень сигналу зменшується, що приводить до погіршення якості зв'язку. Поліпшення якості радіоканалу досягається шляхом автоматичного переключення абонента на інший канал зв'язку. Спеціальна процедура, яка називається передачею керування викликом або *естафетною передачею (handover або handoff)*, дозволяє переключити розмову на вільний канал іншої БС, у зоні дії якої виявився в цей час абонент. Аналогічні дії починаються при зниженні якості зв'язку через вплив завад чи при виникненні несправностей комутаційного устаткування. Для контролю таких ситуацій БС забезпечена спеціальним приймачем, що періодично вимірює рівень сигналу мобільного телефону абонента, що розмовляє, і порівнює його з припустимою межею. Якщо рівень сигналу менше цієї межі, то інформація про це автоматично передається в ЦК по службовому каналу зв'язку. ЦК видає команду про вимірювання рівня сигналу радіотелефону абонента на найближчі до нього БС. Після одержання інформації від БС про рівень цього сигналу ЦК переключає радіотелефон на ту з них, де рівень сигналу виявився найбільшим.

Іноді виникає ситуація, коли потік заявок на обслуговування, що надходить від абонентів стільникової мережі, перевищує кількість каналів, що є на всіх близько розташованих БС. Це відбувається, якщо всі канали станцій зайняті обслуговуванням абонентів і надходить чергова заявка на обслуговування від мобільного абонента (МА). У цьому випадку як тимчасова міра (до звільнення одного з каналів) використовується принцип естафетної передачі всередині стільника. При цьому відбувається по чергове переключення каналів у межах однієї і тієї ж базової станції для забезпечення зв'язком всіх абонентів.

Одна із важливих послуг мережі стільникового зв'язку – *роумінг*, тобто надання можливості використання свого радіотелефону при

поїзді в інше місто, область чи навіть країну. Причому стільникова мережа дозволяє не тільки самому абоненту дзвонити з іншого міста або країни, але й одержувати вхідні дзвінки.

Робота мобільної станції (МС) у межах одного стільника своєї системи (без передачі обслуговування) полягає в наступному.

В роботі МС можна виділити чотири етапи, яким відповідають чотири режими роботи:

- включення та ініціалізація;
- режим очікування;
- режим встановлення зв'язку (виклику);
- режим ведення зв'язку (телефонної розмови).

Після включення МС, тобто після замикання ланцюга живлення, відбувається *ініціалізація – початковий запуск*. Протягом цього етапу відбувається настроювання МС на роботу в складі системи по сигналах, які регулярно передаються БС по відповідним каналам керування, після чого МС переходить в режим очікування. Конкретний зміст етапу ініціалізації залежить від стандарту стільникового зв'язку.

У режимі очікування МС відслідковує:

- зміни інформації системи (ці зміни можуть бути пов'язані як зі змінами режиму роботи системи, так і з переміщеннями самої мобільної станції);
- команди системи (наприклад, команду підтвердити свою працездатність).

МС може періодично, наприклад, раз у 10...15 хвилин, підтверджувати свою працездатність, передаючи відповідні сигнали на БС (підтвердження «реєстрації» чи уточнення місця розташування). У ЦК для кожної з включених МС фіксується стільник, у якій вона «зареєстрована», що полегшує організацію процедури виклику МС. Якщо МС не підтверджує свою працездатність протягом визначеного проміжку часу, ЦК вважає її виключеною, і виклик, що надходить на її номер, не передається.

Процедура встановлення зв'язку полягає в наступному. Якщо з боку системи надходить виклик номера МС, ЦК направляє цей виклик на БС того стільника, у якому «зареєстрована» ця МС або на декілька БС в околиці цього стільника з урахуванням можливого переміщення абонента за час, що пройшов з моменту останньої «реєстрації», а БС передають його по відповідним каналам виклику. МС, що знаходиться в режимі очікування, одержує виклик і відповідає на нього через свою БС, передаючи одночасно дані, необхідні для проведення процедури автентифікації. При позитивному результаті автентифікації призначається канал трафіку і МС повідомляється номер відповідного частотного каналу. МС настроюється на виділений канал і разом із БС виконує необхідні дії по підготовці сеансу зв'язку. На цьому етапі МС виконує наступне:

- настроюється на заданий номер часового слота в кадрі;
- уточнює затримку в часі;
- настроює рівень випромінюваної потужності і т.п.

Вибір часової затримки здійснюється з метою часового узгодження слотів у кадрі (на прийом до БС) при організації зв'язку з МС, що знаходяться на різних відстанях від БС. При цьому часова затримка переданої МС пакету даних регулюється по командах БС.

Потім БС видає повідомлення про подачу сигналу виклику (дзвінка), що підтверджується МС, і викликаючий абонент одержує можливість почути сигнал виклику. Коли абонент, що викликається, відповідає на виклик (знімає трубку), МС видає запит на завершення з'єднання. З завершенням з'єднання починається власне сеанс зв'язку – абоненти ведуть розмову.

У процесі розмови (*режим ведення зв'язку*) МС робить обробку переданих і прийнятих сигналів мови, а також переданих одночасно з мовою сигналів керування. По закінченню розмови відбувається обмін службовими повідомленнями між МС і БС (запит чи команда на відключення з підтвердженням), після чого передавач МС виключається і станція переходить у *режим чекання*.

Якщо виклик ініціюється з боку МС, тобто абонент набирає номер викликуваного абонента, переконується в правильності набору по відображенню на дисплеї і натискає відповідну кнопку («виклик») на панелі керування, то МС передає через свою БС повідомлення з вказівкою викликуваного номера і даними для автентифікації МА. Після автентифікації БС призначає КТ, і наступні кроки по підготовці сеансу зв'язку здійснюються в такий же спосіб, як і при надходженні виклику з боку системи.

Якщо МА розмовляє з іншим МА, то процедура встановлення зв'язку і проведення сеансу зв'язку відбувається практично в такий же спосіб. Якщо при цьому обоє МА відносяться до однієї й тієї ж стільникової системи, то зв'язок між ними встановлюється через ЦК системи без виходу в стаціонарну телефонну мережу.

Автентифікація та ідентифікація

Процедури автентифікації й ідентифікації виконуються при кожному встановленні зв'язку.

Автентифікація – процедура підтвердження дійсності (законності, наявності прав на користування послугами стільникового зв'язку) абонента ССЗ.

Ідентифікація – процедура ототожнення обладнання МС, тобто процедура встановлення приналежності обладнання до однієї із груп («білого», «сірого» або «чорного» списків). Ця процедура використовується для виявлення загублених, вкрадених або несправних мобільних телефонів.

Передача обслуговування

При переміщенні МС із одного стільника в інший, її обслуговування відповідно передається від БС першого стільника до БС другого. Цей процес називається *естафетною передачею* або *передачею обслуговування* (ПО) (хендовер). Процедура передачі обслуговування має місце тільки в тому випадку, коли МС перетинає межу стільників **під час сеансу зв'язку**, зв'язок при цьому не переривається. Якщо МС переміщається з одного стільника в інший, знаходячись у режимі очікування, вона просто відслідковує ці переміщення за інформацією системи, переданою по каналам керування, і в потрібний момент перестроюється на сильніший сигнал іншої БС.

Технічно процедура ПО здійснюється таким чином. Необхідність у ПО виникає, коли якість каналу зв'язку, яка оцінюється за рівнем сигналу і/чи частоті бітової помилки, погіршується нижче припустимої межі.

У стандарті *GSM* зазначені параметри постійно вимірюються МС як для свого стільника, так і для ряду суміжних (до 16 стільників), і результати вимірів передаються на БС.

Організація ПО ґрунтується на вимірах, які виконуються на МС у часових слотах, вільних від передачі і прийому інформації. Крім того, можуть використовуватися і результати вимірів, які виконуються на БС. У цьому полягає відмінність від процедури ПО в аналогових ССЗ, де аналогічні виміри виконувалися тільки на БС.

Обов'язковою умовою ПО з одного стільника в інший є більш висока якість каналу зв'язку у другого стільника у порівнянні з першим. Інакше кажучи, *обслуговування передається із стільника з гіршою якістю каналу зв'язку в стільник із кращою якістю, причому зазначене розходження повинне бути не менше деякої заданої величини*. Якщо не вимагати виконання цієї умови, а передавати обслуговування, наприклад, уже при однаковій якості каналу зв'язку в двох стільниках, то в деяких випадках (зокрема, при переміщенні МС приблизно уздовж межі стільників) можлива багаторазова ПО з першого стільника в інший і зворотно, що приводить до значного завантаження системи і зниженню якості зв'язку.

Прийнявши рішення про ПО і вибравши новий стільник, ЦК сповіщає про це БС нового стільника, а МС через БС старого стільника видає необхідні команди з вказівкою нового частотного каналу, номера робочого слота і т.п. МС перестроюється на новий канал і налаштовується на спільну роботу з новою БС, виконуючи приблизно ті ж кроки, що і при підготовці сеансу зв'язку. Після чого зв'язок продовжується через БС нового стільника. При цьому перерва в телефонній розмові не перевищує частки секунди і залишається непомітною для абонента.

Роумінг

Роумінг – це процедура надання послуг ССЗ абоненту одного оператора в системі іншого оператора. При переміщенні абонента в іншу мережу її ЦКМС запитує інформацію в первинній мережі і при наявності підтвердження повноважень абонента реєструє його. Дані про місце розташування абонента постійно поновлюються в реєстрах первинної мережі, і усі виклики, що туди надходять, автоматично переадресовуються в ту мережу, де в даний момент знаходиться абонент.

Для забезпечення роумінгу необхідне виконання трьох умов:

- стільникові мережі у відповідних регіонах повинні бути однакового стандарту;
- наявність організаційних і економічних угод про роумінгові обслуговування абонентів між цими стільниковими мережами;
- наявність каналів зв'язку між стільниковими мережами, що забезпечують передачу інформації для роумінгових абонентів.

Розрізняють три види роумінгу:

- *автоматичний*;
- *напіваавтоматичний* (коли абоненту для користування даною послугою в якому-небудь регіоні необхідно попередньо повідомити про це свого оператора);
- *ручний* (обмін одного радіотелефону на інший, підключений до ССЗ іншого оператора).

У стандарті *GSM* процедура роумінгу є автоматичною і закладена як обов'язковий елемент. Вона стала ще більш зручною з появою дворежимних, а надалі – і трирежимних абонентських терміналів (*GSM-900/GSM-1800/GSM-1900*).

16.2. Зони обслуговування стільникової мережі.

При розгляді стільникових телефонних мереж (СТМ), на відміну від стаціонарних, варто враховувати те, що абонентська лінія включається не в конкретний вузол комутації, а безпосередньо в мережу та може поєднувати не тільки декілька стільникових мереж у межах однієї країни, але мережі різних країн. Тому необхідно чітко визначити зони обслуговування кожної із структурно-функціональних одиниць.

У загальному вигляді можна виділити наступні зони обслуговування глобальної СТМ (рис. 16.1):

- *стільник (Cell)*;
- *зона місцезнаходження або пошуку (Location Area)*;
- *зона обслуговування ЦКМС (MSC) (MSC Service Area)*;
- *зона обслуговування СТМ загального користування (PLMN Service Area)*;
- *зона обслуговування глобальної СТМ (GSM Service Area)*.

Під *стільником* розуміють зону обслуговування однієї базової станції *BTS*. *Зона місцезнаходження або пошуку* поєднує ряд стільників,

контрольованих одним або декількома контролерами *BSC*, але в межах одного *MSC*. При цьому в межах зони місцезнаходження абонент може вільно переміщатися без відновлення даних у гостьовому реєстрі *VLR*. Крім того, у межах цієї зони обслуговування здійснюється передача адреси для пошуку конкретної *MS*.



Рис 16.1. Зони обслуговування стільникової мережі

Зона обслуговування MSC є частиною *STM*, що обслуговується одним *MSC*, а абонент зареєстрований у *VLR* конкретного *MSC*. У цьому випадку він може вільно переміщатися в межах даної зони обслуговування без передачі його абонентських даних в інший *VLR* і відновлення даних у *HLR*.

Зона обслуговування глобальної STM поєднує всі зони обслуговування національних стільникових телефонних мереж. При цьому мається на увазі, що всі національні *STM* повинні бути побудовані у відповідності зі стандартом *GSM*.

16.3. Нумерація. *MCC*- та *MNC*- коди країн та операторів.

З огляду на те, що *STM GSM* може забезпечити зв'язок *MS* із абонентами стаціонарної ТфЗК (у перспективі *ISDN*), а через неї і з абонентами інших мереж електрозв'язку, вона повинна входити в загальний план нумерації стаціонарної ТфЗК відповідно до рекомендацій *E.164* і *E.212* Міжнародного союзу електрозв'язку.

Для цього застосовують ***MSISDN*** (*Mobile Station ISDN Number*) - номер мобільної станції в загальному плані нумерації мережі *ISDN*, який містить до 15 цифр (в Україні – 12 цифр):

$$\mathbf{MSISDN=CC+NDC+SN,}$$

де *CC* - код країни (1-3 цифри, для України - 380);

NDC - код мережі (наприклад, для МТС – 50, 66, 95, 99);

SN - номер абонента.

Важливо: даний номер не передається по мережі і не міститься на SIM-карті, а в реєстрі HLR стільникової мережі співставлений з номером IMSI.

Номер **IMSI** (*International Mobile Subscriber Identity*) – міжнародний ідентифікатор мобільного абонента, довжина якого не повинна перевищувати 15 цифр. Він зберігається на SIM-карті, формат якого визначений ETSI в специфікації GSM 11.11 (рис.16.2):

$$IMSI = MCC + MNC + MSIN,$$

де **MCC** – мобільний код країни (3 цифри, для України – 255);

MNC – мобільний код оператора (2 цифри, для МТС – 01);

MSIN – ідентифікатор мобільного абонента (10 цифр, перші дві цифри – номер HLR даної мережі).

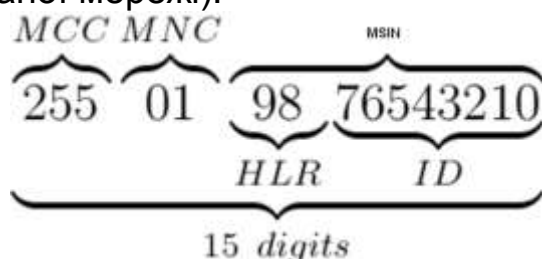


Рис. 16.2. Структура ідентифікатора **IMSI**

Поділ мережі на зони, кластери і стільники передбачає їх нумерацію. Нумерація в системі базової станції дозволяє однозначно визначити місцеположення мобільної станції в мережі, забезпечити її обслуговування і необхідну якість зв'язку.

CGI (*Cell Global Identity*) – глобальний ідентифікаційний номер стільника має вигляд:

$$CGI = MCC + MNC + LAC + CI,$$

де **MCC** (*Mobile Country Code*) – мобільний код країни;

MNC (*Mobile Network Code*) – мобільний код мережі;

LAC (*Location Area Code*) – код локальної території, містить до 16 біт;

CI (*Cell Identification*) - ідентифікаційний номер стільника, містить до 16 біт.

Глобальний ідентифікаційний номер стільника (**CGI**) ідентифікує комірку в мережі GSM. Це означає, що в мережі GSM не можуть бути дві комірки з однаковим номером CGI. Номер можна розділити на дві частини:

– комбінація **MCC–MNC–LAC** утворює так званий **ідентифікаційний номер локальної території (LAI - Location Area Identity)**. Запис про цей номер міститься в **MSC/VLR** (мережевий компонент системи комутації). Для розшуку мобільної станції не

потрібно передавати пошуковий сигнал від всіх базових станцій мережі GSM. При переміщенні мобільної станції з однієї локальної території в іншу, вона надсилає до MSC/VLR запит на оновлення інформації про місцезнаходження. Тому при пошуку мобільної станції пошукові сигнали будуть передаватись лише в межах однієї локальної території (LA).

– ідентифікаційний номер стільника (CI) призначається кожному стільнику і є унікальним в межах локальної території (LA).

BSIC (Base Station Identity Code) – ідентифікаційний код базової станції складається з двох частин:

$$BSIC = NCC + BCC,$$

де **NCC** (National Colour Code) – національний кольоровий код (нумерується від 0 до 7);

BCC (Base Station Colour Code) – кольоровий код базової станції (нумерується від 0 до 7).

Ідентифікаційний код базової станції (BSIC) використовується для того, щоб розрізнити комірки, які працюють на однаковій частоті і належать різним кластерам. Крім того, цей номер може використовуватись для того, щоб розрізнити комірки, що належать різним операторам і перебувають на кордоні двох країн.

Для того, щоб розрізнити операторів в суміжних PLMN, кожному оператору в країні присвоюється певне значення NCC.

Коміркам, які перебувають поблизу державних кордонів, присвоюються різні значення NCC. Припустимо, мобільна станція перебуває в активному режимі і використовує розмовний канал на несучій частоті f_4 в країні B. Мобільна станція вимірює сусідні частоти, в даному випадку частоти f_1 , f_{12} і f_{14} . В країні C частота f_1 використовується в комірці, яка розміщена занадто близько до комірки з тією ж частотою в країні B. Як наслідок, при спробі мобільної станції виміряти частоту f_1 , вона може прийняти неправильний сигнал. Проте вона виявить, що NCC є неправильний і результат вимірювання буде забракований. В даному випадку MS не буде встановлювати виклик в іншій країні, а отже не будуть займатись додаткові сигналізаційні канали, що вигідно для оператора, і абонент збереже свої гроші. Цей метод також може використовуватись і всередині країни, щоб запобігти сигналізації і перемиканням між різними MSC. Дозвіл встановлення виклику в сусідніх країнах визначається оператором для кожної комірки індивідуально шляхом введення відповідної команди в BSC.

Кольоровий код базової станції (BCC) використовується як захист від спільних каналних інтерференційних завад. З цією метою однакових BCC присвоюється всім коміркам у заданому кластері. Таким чином забезпечується максимальне рознесення BCC.

17. Технології передачі даних в мережах **GSM**

17.1. Еволюція мереж **GSM**

В кінці 1980-х років, коли тільки закладались основи *GSM*, існувала думка, що цей стандарт технічно перенасичений і його можливості ніколи реально не будуть використані. Проте вже сьогодні всі базові можливості стандарту не тільки реалізовані, але закладені умови для його подальшої модернізації. Вдосконалення мереж *GSM* відбувалося по кількох взаємозв'язаних напрямках:

- інтеграція з іншими мережами радіозв'язку;
- створення інтегрованих мереж *GSM-900/GSM-1800*;
- впровадження нових технічних рішень, які забезпечують високошвидкісну передачу даних з комутацією пакетів і взаємодія з мережами *TM3K, X.25, ATM* і *ISDN*.

В технологію *GSM* вкладені немалі інвестиції, і це визначило еволюційний шлях її розвитку. Відбувалося поступове нарощування мережевих елементів, вдосконалення контролерів і базових станцій, використання дворезимних абонентських терміналів.

Шляхи модернізації систем на базі *GSM* для підвищення швидкості передачі даних були пов'язані із застосуванням наступних технологій:

- ***HSCSD*** (*High Speed Circuit Switched Data*) - високошвидкісної передачі даних із комутацією каналів;
- ***GPRS*** (*General Packet Radio Service*) - загальної радіослужби пакетної передачі;
- ***EDGE*** (*Enhanced Data Rates For Global Evolution*) – технології «покращеної швидкості передачі даних для еволюції *GSM*».

17.2. Високошвидкісна передача даних з комутацією каналів ***HSCSD***

В базовому стандарті *GSM* для передачі даних використовується технологія ***CSD*** (*Circuit-Switched Data*), яка дозволяла модемне з'єднання на швидкості до 9,6 кбіт/с. Фактично цього достатньо лише для роботи електронної пошти та передачі коротких повідомлень довжиною 160 символів (послуга *SMS*). *Маршрутизація даних* при цьому була реалізована на обладнанні з *комутацією каналів*. Це є незручним для користувача (особливо з фінансових міркувань) та приводить до не ефективного використання ресурсів мережі. В рамках існуючого стандарту *GSM* виконання вимог систем третього покоління неможливе. Збільшення швидкості передачі можливе, наприклад, шляхом надання одному користувачу декількох інтервалів в кадрі *TDMA*.

Першим кроком в напрямку вдосконалення існуючих мереж *GSM* – було застосування технологій ***HSCSD***, що забезпечило підвищення швидкості передачі даних до:

- 19,2 кбіт/с (при об'єднанні двох каналних інтервалів по 9,6 кбіт/с)
або

- 28,8 кбіт/с (при об'єднанні двох каналних інтервалів по 14,4 кбіт/с).

Слід відмітити, що на цих швидкостях у 90-х роках працювало більшість користувачів мережі *Internet* в європейських країнах із використанням існуючих телефонних мереж.

Впровадження *HSCSD* зі швидкістю до 28,8 кбіт/с вимагало в основному модифікації програмних засобів і протоколів обміну, при цьому інфраструктура діючої системи *GSM* залишалася незмінною.

В *HSCSD* використовувалося дві схеми кодування:

- *CS1* - для швидкості передачі 9,6 кбіт/с;

- *CS2* - для швидкості 14,4 кбіт/с.

По мірі розвитку *HSCSD* планувалося подальше збільшення швидкості за рахунок:

- об'єднання чотирьох часових інтервалів і передачі інформації зі швидкістю 38,4 (4·9,6) кбіт/с (схема *CS1*);

- або до 57,6 (4·14,4) кбіт/с (схема *CS2*).

Такий режим вже не підтримувався існуючими на той час *GSM*-телефонами і не міг бути реалізований без їх доробки.

Що стосується ще більшого підвищення швидкості - до 76,8 кбіт/с (*CS1*) або 115,2 (*CS2*) шляхом об'єднання восьми каналів по 9,6 кбіт/с або 14,4 кбіт/с, то реалізація такої можливості вимагала удосконалення архітектури мережі, де швидкість обміну інформації між підсистемою базової станції і підсистемою комутації (*A*-інтерфейс) обмежена величиною 64 кбіт/с.

Незважаючи на можливість підвищення в декілька разів швидкості передачі, *HSCSD* базується технології ***CSD*** і не дозволяє позбавитись від *основного недоліку мереж із комутацією каналів – неефективної обробки невеликих за об'ємом потоків даних*, і відповідно, нераціонального управління радіоресурсами. Для його усунення необхідно було впровадження технологій з комутацією пакетів.

17.3. Радіослужба пакетної передачі ***GPRS***

Наступним кроком на шляху еволюції мереж *GSM* стало впровадження послуг пакетної передачі ***GPRS*** (*General Packet Radio Service*). Технологія *GPRS* забезпечує прозору передачу даних (від абонента до абонента) в пакетному режимі *IP* протоколу з підвищенням швидкості передачі до 115,2 кбіт/с (схема *CS2*).

Послуга передачі даних *GPRS* набудовується над існуючою мережею *GSM* і не потребує кардинальної модернізації існуючої мережної інфраструктури. Як видно з рис. 17.2, впровадження *GPRS* пов'язано в основному із додаванням нових мережних елементів, які призначені для підтримки пакетної передачі даних: *SGSN* та *GGSN* – в комутаційній підсистемі, *PCU* – в підсистемі базових станцій.

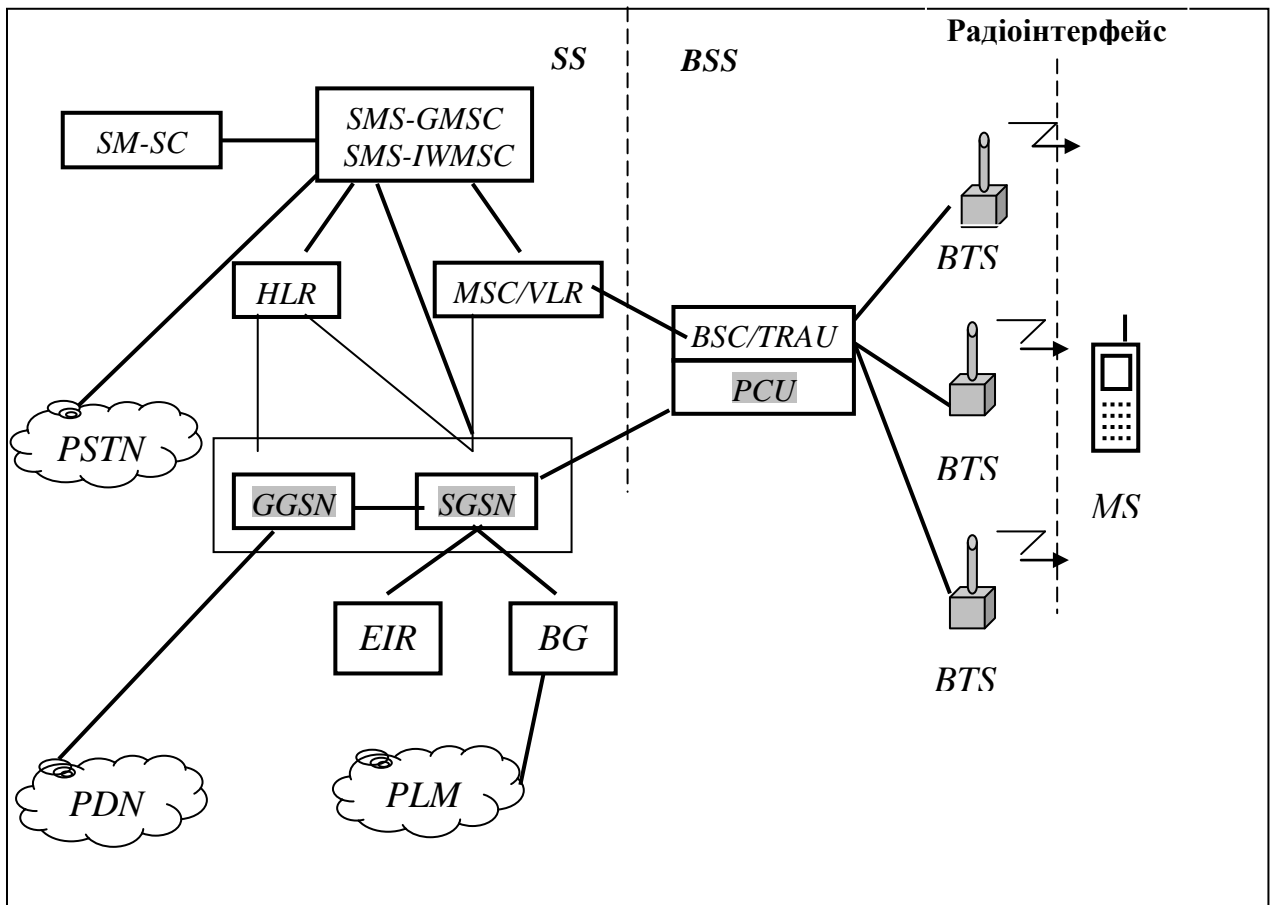


Рис. 17.2. Архітектура модернізованої мережі GSM для підтримки GPRS

- BG (Billing Gateway) – білінговий шлюз;
- BTS (Base Transceiver Station) – базова приймально-передавальна станція;
- EIR (Equipment Identification Register) – реєстр ідентифікації обладнання;
- GGSN (Gateway GPRS Support Node) – шлюзовий вузол підтримки послуг GPRS;
- GMSC (Gateway MSC) – шлюзовий мобільний центр комутації;
- HLR (Home Location Register) – домашній реєстр;
- IWMSC (Interworking MSC) – MSC для забезпечення міжмережевого обміну;
- MSC/VLR (Mobile Switching Center/Visitor Location Register) – мобільний центр комутації суміщений з гостьовим реєстром;
- MS (Mobile Station) – мобільна станція;
- PCU (Packet Controller Unit) – пакетний контролер;
- SGSN (Serving GPRS Support Node) – сервісний вузол підтримки послуг GPRS;
- SM-SC (Short Message Switching Center) – центр комутації коротких повідомлень;
- SMS (Short Message Service) – послуга коротких повідомлень;
- PDN (Public Data Network) – мережа передачі даних загального користування;
- PSTN (Public Switched Telephone Network) – телефонна мережа загального користування;
- PLMN (Public Land Mobile Network) – мережа сухопутного мобільного зв'язку загального користування.

Сервісний вузол *SGSN* забезпечує маршрутизацію пакетів, автентифікацію і шифрування, а також керування мобільністю всіх абонентів, які перебувають в його зоні обслуговування. На вищому мережевому рівні вузол *SGSN* підтримує функції, аналогічні тим, які забезпечує *MSC/VLR* в мережах з комутацією каналів. Вихідний трафік з вузла *SGSN* перенаправляється до контролера базових станцій, і далі – через базові станції до абонентів. Зв'язок мережі *GSM* із зовнішніми мережами передачі даних здійснюється через протоколи *X.25* та *IP* і реалізується через вузол *GGSN*, який відіграє роль шлюзу між *SGSN* та *PDN*. В обладнанні *GGSN* реалізовані функції організації безпеки, обробки рахунків абонентів і динамічного виділення *IP*-адрес. З огляду на те, що вузли *SGSN* відносяться до підсистеми комутації, а не підсистеми базової станції, варіанти їх розміщення, протоколи взаємодії та інтерфейси в даній роботі не розглядаються.

Введення послуг *GPRS* вимагає не тільки вдосконалення контролерів базових станцій та програмного забезпечення, але й призводить до нововведень на радіоінтерфейсі. Для передачі *IP*-трафіка в *GPRS* використовується один або декілька виділених логічних каналів, які називаються *PDCH* (англ. *Packet Data Channel*) та оптимізовані для пакетної передачі даних.

Канальна структура *GPRS* включає три типи логічних каналів:

- канал трафіку пакетних даних *PDTCH* (англ. *Packet Data Traffic Channel*) – для передачі інформаційних пакетів;
- ширококомовний канал керування *PBCCH* (англ. *Packet Broadcast Control Channel*) - для передачі ширококомовної і загальносистемної інформації з базових станцій на мобільні;
- загальний канал керування *PCCCH* (англ. *Packet Common Control Channel*) - для передачі керуючої інформації (повідомлення про виклик, які вказують на початок пакетної передачі, може також використовуватись базовою станцією для передачі даних про розподіл мережевих ресурсів між мобільними станціями).

Проте використання *PCCCH* не є обов'язковим у всіх стільниках мережі *GSM/GPRS*. Замість нього мобільний абонент може використовувати стандартний канал управління *CCCH*.

Один канал *PDCH* відображається в одному часовому інтервалі (слоті) тривалістю 576,92 мкс, що дозволяє використовувати ту ж канальну структуру, що і в звичайних мережах *GSM*. Передача інформації в частотному каналі відбувається зі швидкістю 270,833 кбіт/с з використанням гаусівської маніпуляції з мінімальним зсувом (*GMSK*). Однак з урахуванням передачі даних керування і службової інформації реальна швидкість складає 115,2 кбіт/с (14,4 кбіт/с на часовий слот).

Як і в *GSM*, один символ кодованої послідовності відповідає одному модульованому символу. Формат канального інтервалу в *GPRS* також ідентичний *GSM*, тобто звичайний пакет містить $2 \cdot 57 = 114$ інформаційних бітів, 2 службові біти, 26 бітів тренувальної послідовності і 3 символи

захисних бланків. Сусідні інтервали розділені захисним інтервалом, тривалість якого відповідає 8,25 бітам.

Для забезпечення гнучкості і підвищення пропускної здатності в системі *GPRS* запропоновано чотири схеми кодування даних: від *CS1* до *CS4*. Для керування роботою радіоліній в режимі пакетної передачі розроблено спеціальний протокол *RLC*, який забезпечує її адаптивне настроювання, програмне перенастроювання частоти і керування потужністю. Адаптація радіолінії включає вибір схеми кодування *CS1...CS4* залежно від видів інформації, що передається, характеристик радіоканалу і рівня завад (табл.17.3).

Табл.17.3

Схема кодування	Необхідне співвідношення сигнал/завада, дБ	Швидкість у фізичному каналі, кбіт/с	Максимальна швидкість у частотному каналі, кбіт/с
CS1	6	9,05	72,4
CS2	9	13,4	107,2
CS3	12	15,6	124,8
CS4	17	21,4	171,2

Таким чином, в режимі *GPRS* кожному абоненту може виділятися від 1 до 8 каналних інтервалів. Під час пакетної передачі ресурси лінії зв'язку "вверх" і "вниз" можуть визначатись незалежно, тобто в системі може використовуватись асиметричний режим пакетної передачі. Реалізована на практиці швидкість передачі даних в *GPRS* складає $115,2=(8 \cdot 14,4)$ кбіт/с, проте теоретично вона може бути збільшена до $171,2=(8 \cdot 21,4)$ кбіт/с при використанні схеми кодування *CS4*, з метою резервування в структуру повідомлень *GPRS* введено статусний прапорець в лінії "вверх".

З аналізу якості зв'язку при використанні чотирьох варіантів кодування даних залежно від відношення сигнал/завада (*C/I*) видно:

- перша схема *CS1* гарантує з'єднання в будь-яких умовах і є найбільш зручною при передачі сигналізації і коротких повідомлень;

- друга схема *CS2* призначена для передачі трафіку і дозволяє підвищити пропускну здатність мережі;

- два інших варіанти кодування (*CS3* та *CS4*) забезпечують найвищі швидкості передачі при високому відношенні сигнал/шум, проте при відношенні *C/I* менше, ніж 9 дБ, поступаються *CS1* і *CS2*.

Слід відмітити, що реалізація *CS3* та *CS4* вимагає модернізації *A-bis* інтерфейсу.

Клас *GPRS* характеризує можливості абонентського обладнання і складається з двох частин:

- перша частина визначає порядок здійснення розмови та прийому/передачі даних (*class A* - одночасно обидві послуги, *class B* - по черзі з автоматичним перемиканням, *class C* - тільки однієї із послуг);

- друга частина (*Class 2 ... Class 34*) визначає максимально можливу кількість виділених абоненту часових слотів на прийом та передачу (табл. 17.4).

Табл. 17.4

Клас	Кількість об'єднаних тайм-слотів		
	Для прийому	Для передачі	Максимально допустиме одночасне об'єднання
Class 1	1	1	2
Class 2	2	1	3
Class 3	2	2	4
Class 4	3	1	4
Class 5	2	2	4
Class 6	3	2	4
Class 7	3	3	4
Class 8	4	1	5
Class 9	3	2	5
Class 10	4	2	5
Class 11	4	3	5
Class 12	4	4	5

Наприклад, абонентське обладнання *Class 10* (або *4/2*) передбачає максимальну кількість виділених тайм-слотів на прийом 2, на передачу – 4, але загальна кількість слотів для одного абонента не перевищує 5 і виділяється динамічно в залежності від об'єму прийнятих/переданих абонентом даних. Таким чином, клас *GPRS* фактично визначає максимальну швидкість передачі даних.

Основна відмінність технології *GPRS* від *HSCSD* – новий механізм тарифікації, який допускає можливість сумісного використання декількома абонентами одного канального інтервалу і одночасного надання кількох видів послуг, наприклад, прийом повідомлення від третього абонента під час сеансу зв'язку з другим. В цьому випадку оплата перерозподіляється між різними абонентами, які використовують один канал. Фактично абонент *GPRS* платить не за час зайняття каналу, а тільки за об'єм переданої інформації.

17.4. Технологія *EDGE*

Пропозиція про використання технології високошвидкісного радіодоступу *EDGE* в якості еволюційної бази *GSM* була запропонована групою *ETSI SMG* на початку 1997р. Створений на основі стандарту *GSM* новий радіоінтерфейс *EDGE* (фаза I) забезпечує плавний перехід до третього покоління і дозволяє підвищити швидкість передачі даних до 384 кбіт/с в одному частотному каналі. Що стосується ще більших швидкостей передачі (2048 кбіт/с і вище), які вимагаються для нових поколінь піко- і мікростільникових мереж, то їх реалізація планувалася на другому етапі розвитку *EDGE* (фаза II).

Радіоінтерфейс *EDGE* (ще називають *EGPRS*) набудовується над існуючою схемою радіодоступу *GSM/GPRS* і не вимагає створення нових мережевих елементів. При цьому модернізується апаратна та програмна частини підсистеми базових станцій і абонентського обладнання.

В *EDGE* пропонується *адаптивна модуляція* з комутацією пакетів. В основі лежить використання **9 рівнів кодування від *MCS1* до *MCS9*** з різними характеристиками завадостійкості. Зміна режиму кодування відбувається після аналізу помилок прийнятих блоків даних. Якщо достовірність знижується, то наступний блок передається схемою кодування з більш високим рівнем завадозахищеності.

До основних переваг *EDGE* слід віднести використання спектрально-ефективної модуляції **8PSK** (8-позиційної фазової маніпуляції) і адаптивного настроювання каналу залежно від реального відношення сигнал/завада. Метод модуляції автоматично адаптується до якості каналу радіозв'язку, пропонуючи найвищі швидкості передачі в найбільш сприятливих умовах поширення радіохвиль, особливо поблизу базових станцій.

В технології *EDGE* реалізуються два методи модуляції: *GMSK* (схема кодування до *PCS4*) і *8PSK* (схеми кодування *MCS5 – MCS9*) з однаковою швидкістю передачі символів. Оскільки кожен символ *8PSK* складається з трьох бітів, то ефективність використання спектру *EDGE* майже в 3 рази вища, ніж в *GPRS*.

Максимальна пропускна здатність одного частотного каналу складає 473,6 кбіт/с (59,2 кбіт/с x 8), яку теоретично можливо збільшити до 553,6 кбіт/с.

Нові можливості надасть мультишвидкісний адаптивний мовний кодек *AMR* (англ. *Adaptive MultiRate codec*) з широким діапазоном швидкостей (до 32 кбіт/с). Введення такого мовного кодека в *EDGE* (фаза II) дозволить надавати послуги в мікростільникових мережах.

Таким чином, стандарт *EDGE* є прекрасною платформою для створення інтегрованої *TDMA* технології, яка забезпечить плавний перехід до нових можливостей третього покоління.

Питання самоконтролю до розділу

1. В чому полягають особливості та недоліки технології *HSCSD*?
2. За рахунок чого в технологіях *GPRS* та *EDGE* збільшується швидкість передачі?
3. Від чого залежить вибір тип схеми кодування та типу модуляції в цих технологіях?
4. Що визначають класи *GPRS* ?
5. Які зміни потребуються для впровадження технологій *GPRS* та *EDGE* ?

18. Стільникові мережі технології CDMA

18.1. Принцип кодового розподілу каналів

Метод кодового розділення каналів CDMA (*Code Division Multiple Access*) є практичним додатком сигналів з розширеним спектром. Його реалізація залежить від методу розширення спектру, що використовується: *FHSS* або *DSSS*. Причому, відомі як синхронні, так і асинхронні методи.

Метод багатостанційного доступу з кодовим розділенням каналів був реалізований в декількох стандартах:

- стандарт CDMA, розроблений компанією *Qualcomm*;
- стандарт B-CDMA, розроблений компанією *InterDigital*;
- стандарт FH/CDMA, розроблений компанією *TadiranTelecommunication*;
- стандарт WCDMA, розроблений компанією *LucentTechn.*

Ці стандарти значно відрізняються один від одного за способом кодування в каналах і методом розширення спектру.

Розглянемо особливості кодового розподілу каналів з використанням технології *DSSS*, який отримав назву *DS CDMA (Direct Sequence CDMA)* та знайшов використання в стандартах *TIA/EIA/IS-95(cdmaOne)*, *cdma2000*, *WCDMA*.

В технології *DS CDMA* інформацію, що підлягає передачі, спочатку кодують, а код перетворюють у широкосмуговий шумоподібний сигнал (ШПС) таким чином, що його можна виділити знову на приймальній стороні тільки при наявності відповідного коду, який використовувався для розширення спектру. При цьому одночасно в одній смузі частот можна передавати і приймати безліч сигналів.

Метод прямої послідовності для розширення спектру (*DSSS*) передбачає, що кожний інформаційний біт («0» або «1») замінюється послідовністю так званих «чипов». Оскільки тривалість одного чіпа в n разів менше тривалості інформаційного біта, то і ширина спектра перетвореного сигналу буде в n разів більше ширини спектра початкового сигналу. Чіпові послідовності, що «вбудовуються» в інформаційні біти, називають шумоподібними кодами (*PN-послідовності*). Це здійснюється шляхом подвійної модуляції несучої переданим інформаційним сигналом і широкосмуговим кодуєчим сигналом.

В методі *DS CDMA* відбувається накладання інформаційного потоку на широкосмугову кодову послідовність перед модуляцією несучої. При цьому вузько смуговий інформаційний сигнал перемножується з псевдовипадковою послідовністю (ПВП). В результаті перемножування сигналів джерела псевдовипадкового шуму з інформаційним сигналом енергія останнього розподіляється в широкій смузі частот, тобто його спектр розширюється. Просте розширення спектру сигналів знижує ефективність використання частотного ресурсу. Для того, щоб цього не сталося, знов сформовані сигнали передаються в одній смузі частот із

перекриттям у часі, а для того, щоб на прийомі їх можна було виділити, сигнали повинні бути *ортогональними*.

В якості псевдовипадкових послідовностей, наприклад, в системах стандарту IS-95, використовуються ортогональні послідовності на основі *функцій Уолша*, які є строками матриці Адамара (рис.18.1):

$$H_{2n} = \begin{bmatrix} H_n & H_n \\ H_n & -H_n \end{bmatrix}$$

Рис.18.1. Матриця Адамара розміром $2n \times 2n$

При цьому, наприклад, інформаційну «1» першого каналу можливо передавати першим рядком матриці, інформаційний «0» - інверсією цього рядка. Відповідно для передачі другого каналу – використовувати інший рядок матриці.

Адреса абонента визначається формою псевдовипадкової послідовності (в даному випадку - одним із варіантів функції Уолша), яка використовувалася для розширення спектру. Для виділення сигналу на виході приймача застосовується цифровий фільтр. При ортогональних сигналах фільтр можна настроїти таким чином, що на його виході завжди буде логічний «0», за винятком випадків, коли приймається сигнал, на який він був налаштований.

Таким чином, практична реалізація кодового ущільнення каналів на прикладі прямого каналу, тобто від базової станції до мобільної, зводиться у спрощеному вигляді до наступного:

- інформаційним потокам для N абонентів призначається своя кодова псевдовипадкова послідовність (ПВП), тобто відповідна індивідуальна функція (наприклад, функція Уолша);
- кодові послідовності повинні бути не корельованими, тобто ортогональними;
- бінарні інформаційні потоки від кожного абонента модулюються індивідуальною ПВП;
- сформовані каналні широкосмугові сигнали для різних абонентів додаються в підсумовуючому пристрої (мажоритарному суматорі) передавача, тобто передаються одночасно в одній смузі частот;
- модуляція несучої частоти здійснюється результируючим складним широкосмуговим сигналом;
- отриманий вихідний сигнал підсилюється і випромінюється в радіоканал.

На приймальній стороні абонентської станції:

- здійснюється перенесення сигналу з радіочастоти в область низьких частот;
- низькочастотний сигнал поступає на вхід корелятора, на другий вхід якого синхронно поступає кодувача ПВП (наприклад, відповідна функція Уолша);
- корелятор, що складається із перемножувача та інтегратора, обчислює взаємно-кореляційну функцію двох сигналів;

- відгук на виході корелятора відбувається тільки тоді, коли в ущільненому складному сигналі присутня "своя" індивідуальна ПВП, в інших випадках - на виході спостерігається тільки шум.

В стандарті IS-95 для формування ПВП використовується матриця 64-го порядку. Це дозволяє отримати 64 фізичні канали. Кодування по Уолшу застосовується в прямому каналі (від БС до МС) для поділу каналів різних користувачів. Число абонентів у системі CDMA залежить від рівня взаємних завад. Узгоджувальні фільтри приймачів БС є квазіоптимальними в умовах взаємної інтерференції між абонентами одного стільника і дуже чутливими до ефекту «близько-далеко». Ефективна робота системи з кодовим доступом можлива лише при вирівнюванні сигналу від різних абонентів на вході приймача базової станції. Чим точніше керування потужністю, тим більша абонентська ємність системи і більша зона покриття.

У технічних рішеннях компанії *Qualcomm* розширення спектру забезпечується за рахунок модуляції сигналу псевдовипадковою послідовністю з частотою проходження дискретів 1,23 МГц. Більш точно ця частота складає 1,2288 МГц ($1228800 = 9600 \times 128$). При частоті інформаційної бітової послідовності 9,6 кбіт/с тривалість одного біта відповідає 128 дискретам псевдовипадкової модулюючої послідовності. Смуга сигналу з розширеним спектром на рівні 3 дБ складає 1,23 МГц, причому за допомогою цифрового фільтру формується спектр, близький до прямокутного.

Для модуляції сигналу в стандарті IS-95 використовуються три види функцій:

- «коротка» ПВП;
- «довга» ПВП;
- функції Уолша порядків від 0 до 63.

Всі вони є загальними для базових і мобільних станцій, але реалізують різні функції (табл. 18.1).

Довжина «короткої» ПСП складає $2^{15}-1=32767$ знаків, а «довгої» ПСП – $(2^{42}-1) = 4,4 \times 10^{12}$ знаків. Тривалість дискрета для всіх трьох модулюючих функцій однакова і відповідає частоті проходження дискретів 1,2288 МГц.

У прямому каналі (від БС до рухомої, рис. 18.2) модуляція сигналу здійснюється:

- функціями Уолша (*BPSK* - бінарна фазова маніпуляція) - для розподілу різних фізичних каналів даної БС;
- «довгою» ПВП (*BPSK*) – з метою шифрування повідомлень;
- «короткою» ПВП (*QPSK* - квадратурна фазова маніпуляція двома ПВП однакового періоду) – для розширення смуги і розподілу сигналів різних БС.

Параметри кодових послідовностей в стандарті IS-95

Таблиця 18.1

Тип сигналу	Довжина коду	Виконувані функції	
		Базова станція	Мобільна станція
Код Уолша	64	Кодове ущільнення або поділ 64 каналів CDMA	Завадостійке кодування
Короткий код	32767	Поділ сигналів базових станцій за значенням циклічного зсуву	Код з однаковим фіксованим циклічним зсувом – як опорний сигнал скремблера
Довгий код	$2^{42} - 1$ ($4,4 \times 10^{12}$)	Послідовний довгий код – як опорна послідовність скремблера	Довгий код з різними циклічними зсувами - як адресна послідовність

Розходження сигналів різних базових станцій забезпечується тим, що всі БС використовують однакову «коротку» ПВП, але зі зсувом на 64 дискрети між різними станціями. Тобто всього існує 511 різних комбінацій для ідентифікації БС.

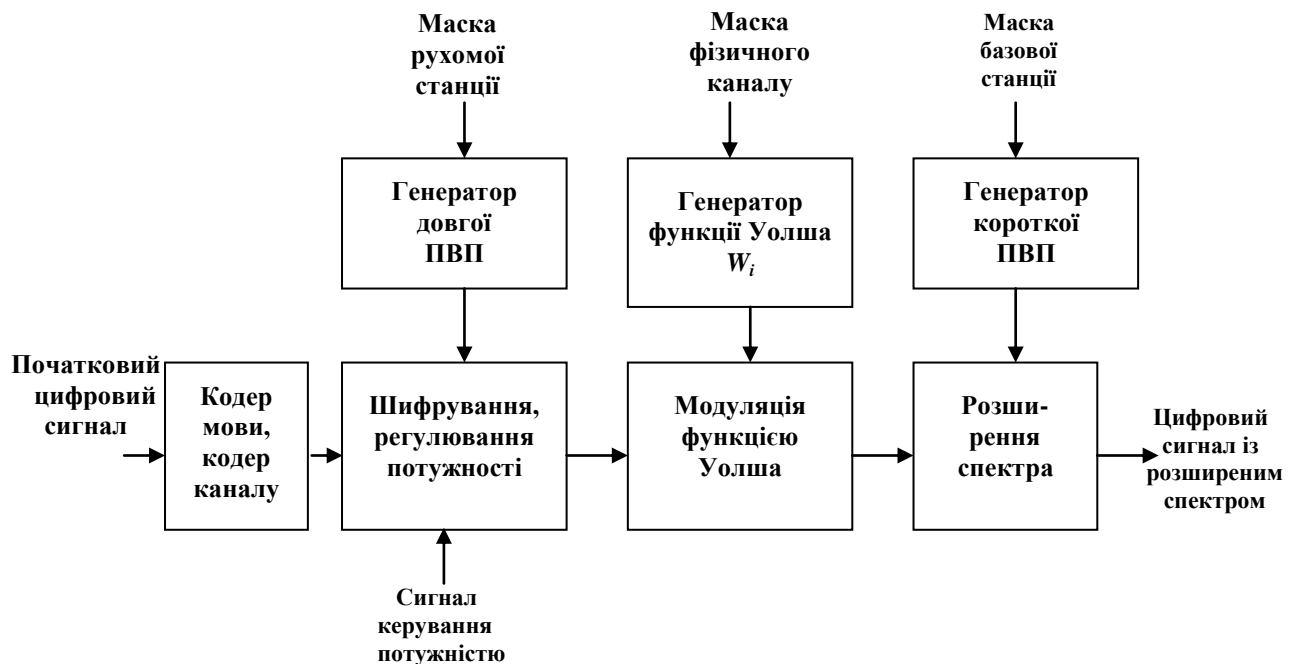


Рис. 18.2. Схема обробки сигналів у передавальному тракті базової станції

Сигнали різних каналів взаємно ортогональні, що гарантує відсутність взаємних завад між ними на одній БС. Внутрішньосистемні завади в основному виникають від передавачів інших БС, що працюють на тій же частоті, але з іншими циклічними зсувами.

На БС формуються 4 типи каналів:

- канал пілот-сигналу (**PI**);
- синхроканал (**SYNC**);
- канал виклику (**PCH**);
- канал трафіка (**TCH**).

Випромінювання пілот-сигналу відбувається безупинно. Для його передачі використовують функцію Уолша нульового порядку (W_0). *Пілот-сигнал* – це сигнал несучої, котрий використовується мобільною станцією для вибору робочого осередку (по найбільш могутньому сигналу), а також - в якості опорного для синхронного детектування сигналів інформаційних каналів. Звичайно на пілот-сигнал випромінюється близько 20% загальної потужності, що дозволяє мобільній станції забезпечити точність виділення несучої частоти і здійснити когерентний прийом сигналів.

У *синхроканалі* (**SYNC**) вхідний потік зі швидкістю 1,2 кбіт/с перекодується в потік, який передається зі швидкістю 4,8 кбіт/с. *Синхрповідомлення* містить технологічну інформацію, необхідну для встановлення початкової синхронізації на МС: дані про точний системний час, про швидкість передачі в каналі PCH, про параметри „короткого” і „довгого” коду. Швидкість передачі в синхроканалі нижча, ніж у каналі виклику (PCH) або каналі трафіку (TCH), завдяки чому підвищується надійність його роботи. По завершенню процедури синхронізації МС настроюється на канал виклику PCH і постійно контролює його. Для кодування синхроканалу використовується функція W_{32} .

Функції $W_1 - W_7$ використовуються для кодування каналів виклику. Їх кількість може складати від 0 до 7, інші функції Уолша використовуються для кодування каналів трафіку. Число каналів трафіку може складати від 55 до 62.

При передачі сигналу від БС використовується згортаюче кодування зі швидкістю $R = 1/2$ ($R=k/n$, де k – кількість біт вхідної послідовності, n - вихідної) і кодовим обмеженням (визначає довжину регістра зсуву) $k = 9$. Для боротьби із завмираннями в стандарті IS-95 передбачене блочне перемешування символів, що дозволяє декорелювати пакети помилок. Швидкість передачі по каналу TCH може змінюватися від 1,2 кбіт/с до 9,6 кбіт/с, що дозволяє динамічно адаптувати трафік до умов поширення радіохвиль. Для прийому сигналів використовується RAKE-приймач, що має кілька каналів обробки.

У IS-95 допускається використання декількох типів мовних кодеків:

- **CELP** (9,6 кбіт/с);
- **QCELP** (13 кбіт/с);
- **EVRC** (8 кбіт/с).

Типові значення оцінки якості за шкалою MOS для алгоритму CELP складає 3,7 бали (9600 біт/с) і 3,0 бали (4800 біт/с). Внесена алгоритмом CELP затримка не перевищує 30 мс. Якість передачі мови у вокодері

QCELP (Qualcomm CELP) дуже близька до якості передачі по провідних лініях (4,02 бали).

У зворотному каналі (від мобільної станції до базової, рис. 18.5) модуляція сигналу „короткою” ПВП використовується тільки для розширення спектру, причому всі мобільні станції використовують ту ж саму пару послідовностей з однаковим (нульовим) зсувом. Модуляція сигналу «довгою» ПВП, крім шифрування повідомлень, несе інформацію про МС у вигляді її закодованого індивідуального номера і забезпечує розділення сигналів від різних МС одного осередку за рахунок індивідуального для кожної станції зсуву послідовності.

У МС передбачено два типи інформаційного обміну (типи каналів):

- канал доступу (**ACH**);
- канал трафіку (**TCH**).

Пілот-сигналу в зворотному каналі немає, тому синхронне детектування не використовується. БС здійснюють некогерентну обробку сигналів, а завадостійкість забезпечується в основному за рахунок просторового рознесення.

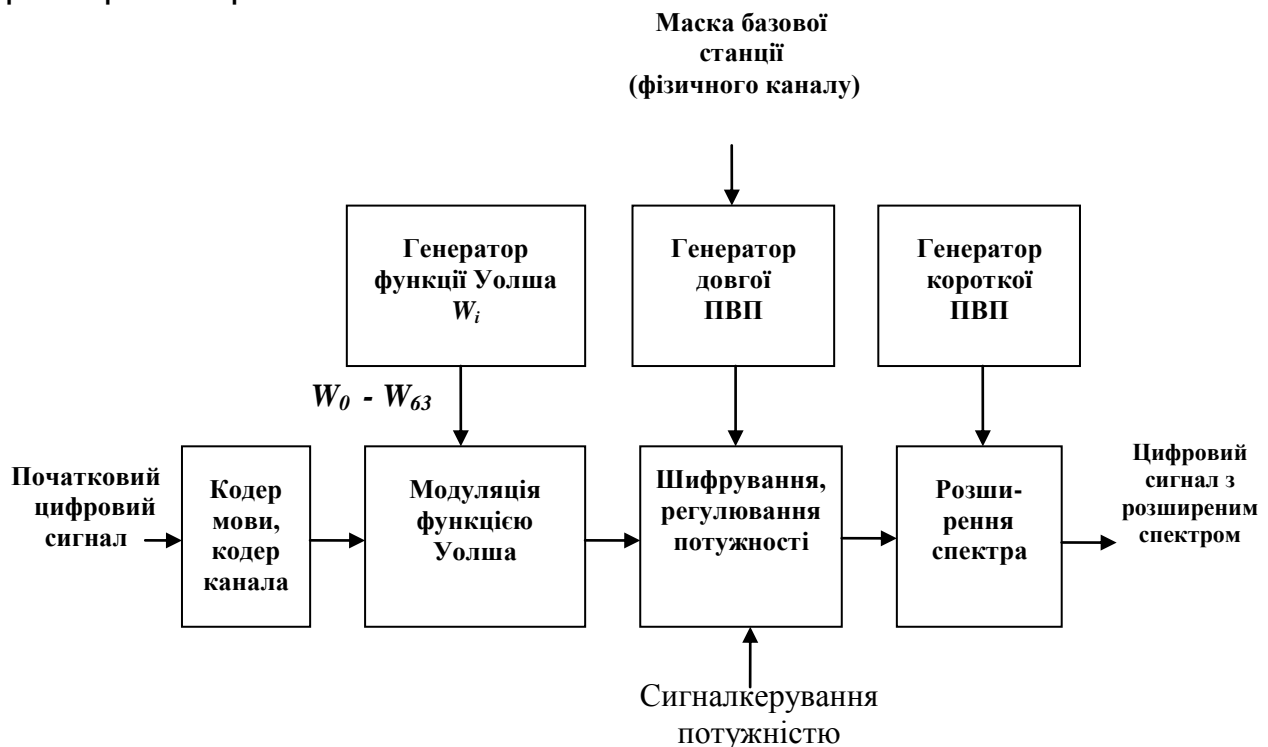


Рис. 18.3. Схема обробки сигналів у передавальному тракті мобільної станції

Вкодеках МС теж застосовуються ортогональні коди Уолша, але не для ущільнення каналів (як на БС), а для підвищення завадостійкості. З цією метою вхідний потік даних зі швидкістю 28,8 кбіт/с розбивається на пакети по 6 біт і кожному з них однозначно ставиться у відповідність одна з 64 послідовностей Уолша. У підсумку швидкість кодованого потоку на вході модулятора зростає до 307,2 кбіт/с. Це кодування однакове для всіх фізичних каналів. На приймальному боці використовуються 64 паралельні канали, кожний з яких настроєний на

свою функцію Уолша, і ці канали розпізнають (декодують) прийняті 6-бітові символи.

У зворотному каналі, як і в прямому, для захисту від помилок використовується згортаюче кодування з довжиною обмеження 9, але зі швидкістю 1/3 (тобто з удвічі більшою надмірністю – це міра компенсації відсутності синхронного детектування), і перемежування на інтервалі 20 мс. В результаті кодування швидкість в інформаційному каналі збільшується до 28,8 кбіт/с.

На рис. 18.4 приведена спрощена структурна схема, що пояснює принцип роботи системи стандарту CDMA. Інформаційний сигнал кодується по Уолшу, потім змішується з несучою, спектр якої попередньо розширюється перемноженням із сигналом джерела псевдовипадкового шуму. Кожному інформаційному сигналу призначається свій код Уолша, потім вони поєднуються в передавачі, пропускаються через фільтр, і загальний шумоподібний сигнал випромінюється передавальною антеною.

На вхід приймача надходять корисний сигнал, фоновий шум, завади від БС сусідніх осередків і від МС інших абонентів. Після ВЧ - фільтрації сигнал надходить на корелятор, де відбувається стискання спектру і виділення корисного сигналу в цифровому фільтрі за допомогою заданого коду Уолша. Спектр завад розширюється, і вони з'являються на виході корелятора у вигляді шуму. На практиці в МС використовується декілька кореляторів для прийому сигналів з різним часом поширення в радіотракті або сигналів, які передаються різними БС.

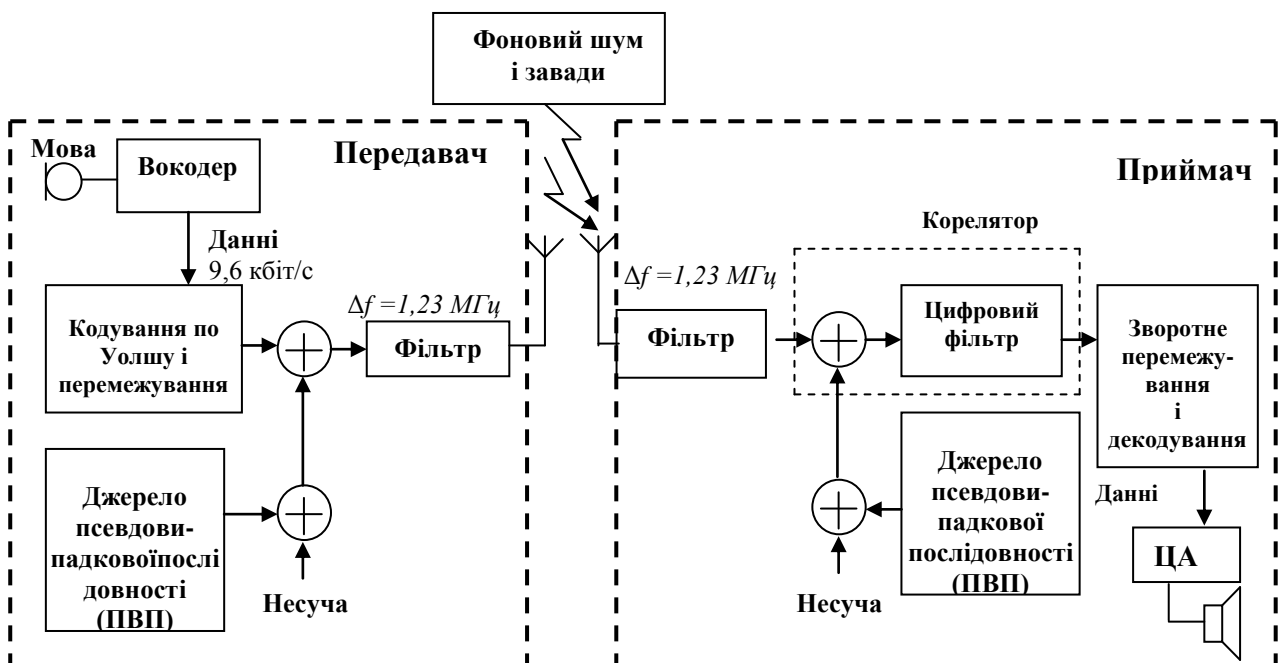


Рис. 18.4. Принцип роботи системи стільникового зв'язку стандарту CDMA

19. Функціонування стільникової системи стандарту *CDMA*

19.1. Основні технічні характеристики систем *CDMAone*

Стільникова система мобільного радіозв'язку загального користування з кодовим розподілом каналів (*CDMA*) вперше була розроблена фірмою *Qualcomm* (США). Основна мета розробки полягала в тому, щоб збільшити ємність системи стільникового зв'язку у порівнянні з аналоговою не менше, ніж на порядок і, відповідно, збільшити ефективність використання виділеного спектру частот.

Технічні вимоги до системи *CDMAone* сформовані в ряді стандартів Асоціації телекомунікаційної промисловості (*TIA*):

- *IS-95* - *CDMA*-радіоінтерфейс (має наступні версії: *IS-95A*, *IS-95B*, *IS-95C*)
- *IS-96* - *CDMA*-мовні служби
- *IS-97* - *CDMA*-мобільна (рухома) станція
- *IS-98* - *CDMA*-базова станція
- *IS-99* - *CDMA*-служби передачі даних.

Версія *IS-95B* дозволяє за рахунок об'єднання до 8 каналів збільшити швидкість передачі даних до $14,4 \cdot 8 = 115,2$ кбіт/с.

Система *CDMA* фірми *Qualcomm* розрахована на роботу в діапазоні частот 800 МГц, виділеному для стільникових систем стандартів *AMPS* і *D-AMPS*.

Система *CDMA* *Qualcomm* побудована по методу *прямого розширення спектру частот* на основі використання 64 видів *послідовностей*, сформованих за законом функцій Уолша. Для передачі мовних повідомлень обраний мовоперетворюючий пристрій з алгоритмом *CELP* зі швидкістю перетворення 8 кбіт/с (9600 біт/с у каналі). Можливе застосування також кодеків *QCELP* (*Qualcomm CELP*) (13 кбіт/с) або *EVRC* (*Enhanced Variable Rate Codec*) (8 кбіт/с).

У каналах системи *CDMA* застосовується кодування з функцією згортання зі швидкістю 1/2 (у каналах від базової станції) і 1/3 (у каналах від мобільної станції), декодер Вітербі з м'яким рішенням, перемежування переданих повідомлень. Загальна смуга каналу зв'язку складає 1,25 МГц. Основні характеристики стандарту *CDMA* *Qualcomm* і технічні параметри устаткування мереж приведені в таблиці 19.1.

В стандарті передбачена роздільна обробка відбитих радіосигналів, які приходять з різними затримками, і наступне їх вагове додавання, що значно знижує негативний вплив ефекту багатопроменевості. При роздільній обробці променів у кожному каналі прийому на базовій станції використовуються до 4 паралельно працюючих кореляторів, а на мобільній станції – до 3 кореляторів. Такий пристрій отримав назву *RAKE*-приймача. Наявність паралельно працюючих кореляторів дозволяє здійснити *м'який режим "естафетної передачі"* (*Soft Handoff*) при переході з стільника в стільник. Це відбувається за рахунок паралельної передачі повідомлення на мобільну станцію декількома

базовими станціями.

Основні технічні характеристики стандарту *CDMAone (IS-95)*

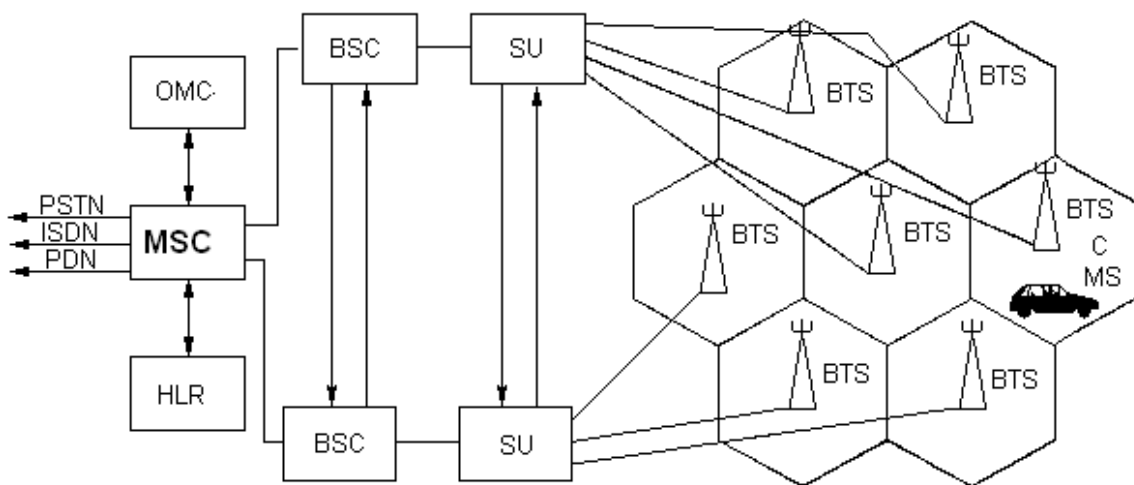
Таблиця 19.1

Основні параметри	Значення
Діапазон частот передачі <i>MS</i> , МГц	824 - 849
Діапазон частот передачі <i>BTS</i> , МГц	869 - 894
Дуплексна схема / рознесення дуплексних каналів	<i>FDD/45</i> МГц
Метод множинного доступу	<i>CDMA</i>
Вид модуляції несучої частоти	<i>QPSK</i> (прямий канал), <i>OQPSK</i> (зворотний канал)
Ширина спектру випромінюваного сигналу: на рівні -3 дБ / - 40 дБ, МГц	1,25/1,50
Тактова (чіпова) частота ПВП, МГц	1,2288
Кількість каналів <i>BTS</i> на одній несучій частоті	64 канали: 1 пілот-канал, 1 канал сигналізації, до 7 каналів виклику, 55...62 каналів трафіку
Кількість каналів <i>MS</i>	1 канал доступу, 1 канал трафіку
Швидкість передачі даних, біт/с: в каналі синхронізації в каналі персонального виклику і доступу в каналах зв'язку	1200 9600, 4800 9600, 4800, 2400, 1200
Відносна нестабільність несучої частоти <i>BTS</i>	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$
Відносна нестабільність несучої частоти <i>MS</i>	$\pm 2,5 \cdot 10^{-6}$
Необхідне співвідношення сигнал/шум, дБ	$\geq 6...7$
Максимально ефективна випромінювана потужність <i>BTS/MS</i> 1 клас / 2 клас / 3 клас, Вт	50 / 6,3/2,5/1,0
Точність керування потужністю передавача <i>MS</i> , дБ	$\pm 0,5$
Чутливість приймача, дБм :	
<i>BTS</i>	-117
<i>MS</i>	-105
Кількість каналів <i>RAKE</i> - прийому <i>MS/BS</i>	3 / 4
Джерело синхронізації <i>BS</i>	<i>GPS</i>

Транскодер, що входить до складу основного обладнання, проводить оцінку якості прийому сигналів від двох базових станцій послідовно кадр за кадром. Процес вибору кращого кадру приводить до того, що результуючий сигнал може бути сформований у процесі безперервної комутації і наступного "склеювання" кадрів, прийнятих від різних базових станцій, що беруть участь у "естафетній передачі". М'яке переключення забезпечує високу якість прийому мовних повідомлень і усуває перерви в сеансах зв'язку, що має місце в стільникових мережах зв'язку інших стандартів. Недоліком є те, що для обслуговування однієї мобільної станції необхідно задіяти дві базові станції.

19.2. Конфігурація мережі CDMA

На рис. 19.1 приведена узагальнена структурна схема мережі стільникового мобільного радіозв'язку CDMA, основні елементи якої (*BTS*, *BSC*, *MSC*, *OMC*) аналогічні тим, що використовуються в інших стільникових мережах. Основна відмінність полягає в тому, що до складу мережі CDMA включені пристрої оцінки якості і вибору кадрів (*SU*), які розміщуються сумісно з відповідними контролерами. Крім того, для реалізації процедури м'якого переключення між базовими станціями, які керуються різними контролерами (*BSC*), додаються лінії передачі між *SU* і *BSC* (*Inter BSC Soft handoff*)



- BTS** (*Base Transceiver Station*) - базова приймально - передавальна станція
- BSC** (*Base Station Controller*) - контролер базових станцій
- OMC** (*Operation and Maintenance Centre*) - центр керування й обслуговування
- SU** (*Selector Unit*) - пристрій вибору кадру
- DB** (*Data Base*) - база даних про абонентів і устаткування
- MSC** (*Mobile Switching Centre*) - центр комутації мобільного зв'язку

Рис. 19.1. Конфігурація мережі стандарту CDMA

Для передачі даних трафіку та керування в CDMA використовуються логічні канали: прямими (*Forward Channel*) - для передачі з базової станції, зворотні (*Reverse Channel*) - для передачі з мобільної станції. Структура каналів у CDMA в стандарті IS-95 показана на рис. 19.2.

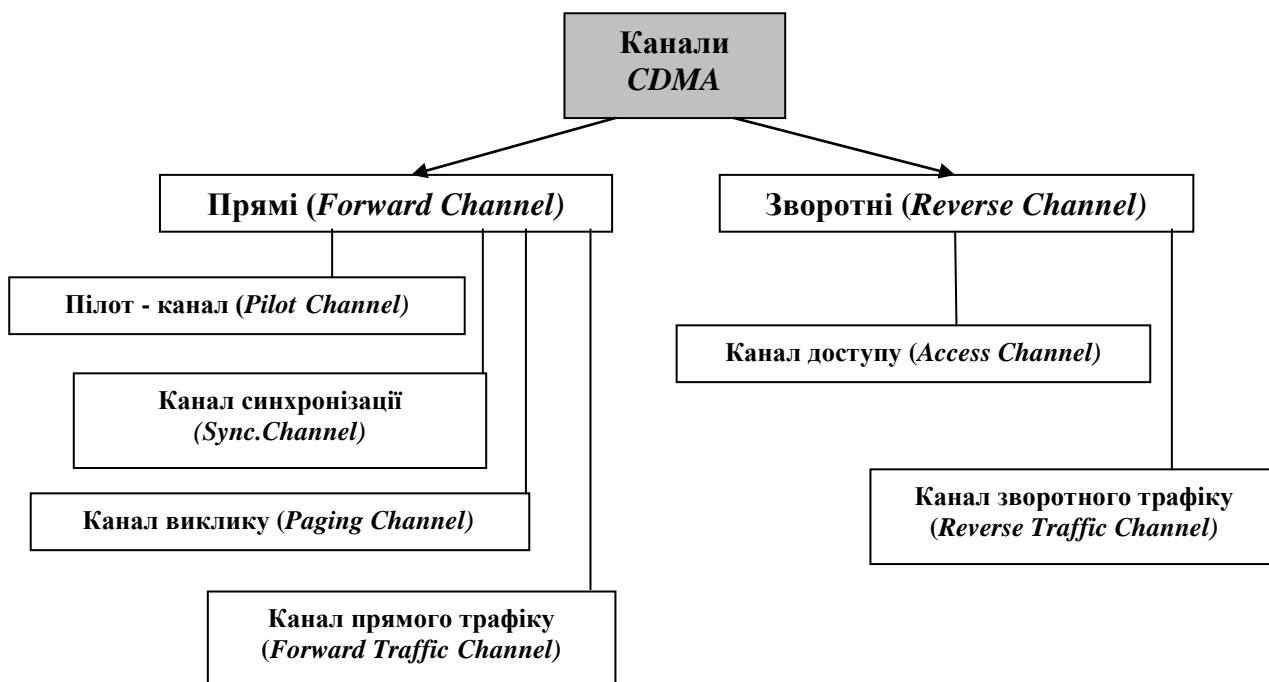


Рис. 19.2. Структура логічних каналів стандарту CDMA

Прямі канали в CDMA:

- **Пілот - канал** - використовується мобільною станцією для початкової синхронізації з мережею і контролю за сигналами базової станції за часом, частотою і фазою, випромінювання пілот-сигналу відбувається постійно.

- **Канал синхронізації** – призначений для передачі технологічної інформації, необхідної для початкової синхронізації МС: системний час, швидкості передачі, параметри короткого та довгого кодів тощо

- **Канал виклику** - використовується для виклику мобільної станції. Після прийому сигналу виклику мобільна станція передає сигнал підтвердження на базову станцію, після чого по каналу виклику на мобільну станцію передається інформація про встановлення з'єднання і призначення каналу зв'язку. Канал персонального виклику починає працювати після того, як мобільна станція одержить усю системну інформацію (частоту несучої, тактову частоту, затримку сигналу тощо) по каналу синхронізації.

- **Канал прямого трафіку** - призначений для передачі мовних повідомлень і даних, а також керуючої інформації з базової станції на мобільну.

Зворотні канали в CDMA:

- **Канал доступу** - забезпечує зв'язок мобільної станції з базовою станцією, коли мобільна станція ще не використовує канал трафіку. Канал доступу використовується для передачі викликів і відповідей на повідомлення, які були передані по каналу виклику (*Paging Channel*), команди і запити на реєстрацію в мережі.

- **Канал зворотного трафіку** - забезпечує передачу мовних повідомлень і керуючої інформації з мобільної станції на базову станцію.

Базова станція одночасно може передавати 64 канали, з яких 2 канали використовуються для синхронізації, до 7 - для персонального виклику (*Paging*), інші 55...62 - для передачі мовних повідомлень (*Traffic*).

У кожному каналі при передачі використовується одна із 64 послідовностей Уолша. При зміні знака біта інформаційного повідомлення фаза використовуваної послідовності Уолша змінюється на 180 градусів. Через те, що ці послідовності взаємно ортогональні, взаємні завади між каналами передачі однієї базової станції відсутні. Завади по каналах передачі базової станції створюють лише сусідні базові станції, що працюють у тій же смузі радіочастот і використовують таку ж псевдовипадкову послідовність (ПВП), але з іншим циклічним зсувом.

19.3. Особливості регулювання потужності

Необхідність динамічного регулювання потужності обумовлена наступними аспектами:

1. Для ефективного проходження повідомлення по радіоканалу, потужність сигналу, що приймається, повинна істотно перевищувати потужність завад. На рівень сигналу, що приймається, впливає відстань, а також багатопроменеве розповсюдження сигналу.

2. Бажано мінімізувати потужність сигналу для зменшення інтерференції з каналами віддалених комірок, шкоди здоров'ю людей і економії енергії батареї живлення.

3. В системах з розширеним спектром (**SS**), які використовують множинний доступ з кодовим розділенням каналів (**CDMA**), бажано вирівняти потужності сигналів, що приймаються базовою станцією від різних мобільних пристроїв. Це значно впливає на продуктивність системи, оскільки всі користувачі одночасно користуються загальною смугою частот.

В стандарті *IS-95* визначено, що регулювання рівня потужності мобільної станції здійснюється в динамічному діапазоні 84 дБ з кроком 1 дБ. Інтервал між сусідніми вимірами дорівнює 1,25 мс (частота оновлення даних - 800 Гц). При цьому передбачено три схеми управління потужністю:

- розімкнута;
- замкнута;
- зовнішня петля регулювання.

В першому способі (рис. 19.3а) *рішення про зміну потужності приймає виключно мобільна станція (МС)* за результатами аналізу стану прямого каналу, без урахування відповідної реакції базової станції (БС). В таких системах БС безперервно передає пілот-сигнал, рівень якого оцінюється мобільною станцією. За наслідками оцінки мобільна станція встановлює рівень переданої потужності в зворотному каналі (від МС до БС), який обернено-пропорційний потужності пілот-сигналу, що

приймається. При цьому вважають, що інтенсивності сигналів в прямому і зворотному каналах зв'язу корелюють. Даний вид регулювання не такий точний, але дозволяє оперативно реагувати на швидкі флуктуації інтенсивності сигналу, що дуже важливо особливо в каналах зв'язу систем *CDMA*.

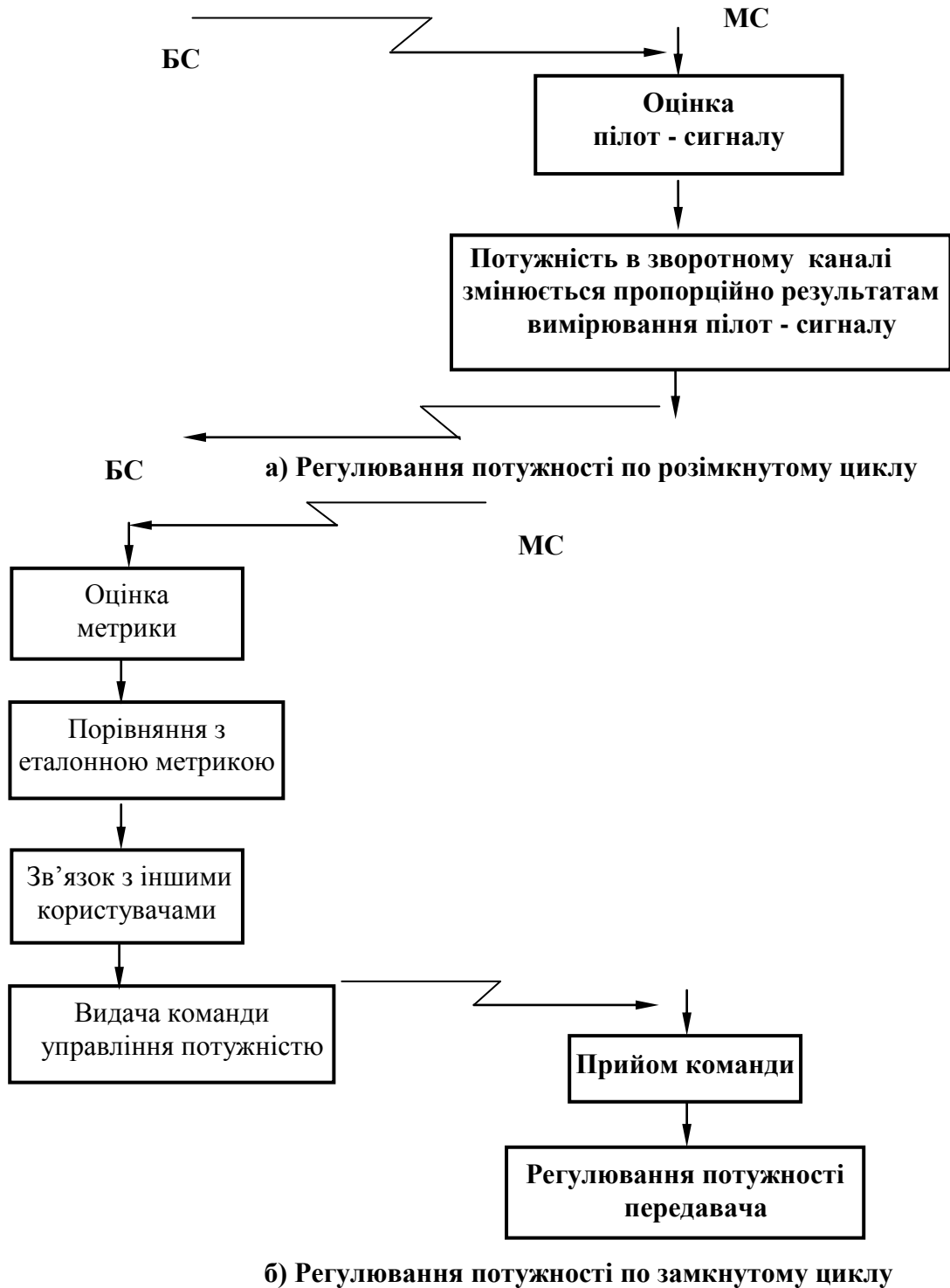


Рис. 19.3. Регулювання потужності в зворотному каналі.

При другому способі регулювання БС постійно відстежує рівень сигналу, прийнятого від кожної мобільної станції, вимірює його потужність і оцінює ймовірність помилки або відношення сигнал/шум (S/N). Рівень сигналу оцінюється на виході *RAKE*-приймача. БС визначає загальний рівень завад на заданій частоті і одночасно генерує порогове відношення сигнал/завада ($SIR_{\text{пор}}$), після чого формує команду *TPC* (*Transmit Power Control*) у відповідності з наступним правилом:

- якщо $S/N_j > SIR_{\text{пор}}$, то потужність необхідно зменшити ($DTPC=-1$);
- якщо $S/N_j < SIR_{\text{пор}}$, то потужність необхідно збільшити ($DTPC=+1$)

Тобто БС приймає рішення про регулювання потужності і передає команду управління на МС. Даний спосіб може використовуватися і для регулювання потужності в прямому каналі.

Висновки:

- в стандартах стільникового зв'язку *CDMA* використовуються широкосмугові шумоподібні сигнали, в яких розширення спектру відбувається по методу прямої послідовності (*DSSS*);

- для кодового розподілу каналів використовують ортогональні коди (Уолша, Голда тощо), якими модулюють індивідуальні інформаційні потоки (даних та керування); на приймальному боці в кореляторі застосовуючи той же самий код виділяють інформацію відповідного каналу;

- сусідні базові станції мережі можуть працювати на однакових частотних каналах, але з різним зсувом «короткого коду» (зсув на 64 дискрети, всього 511 різних комбінацій); коефіцієнт повторного використання частот для *CDMA* дорівнює 1;

- дуже важливо на вході приймача БС вирівняти сигнали від різних МС, що впливає на ефективність роботи мережі, а саме – визначає її каналну ємність;

- на приймальному боці МС застосовують *RAKE*-приймач, який дозволяє одночасно обробляти сигнали декількох БС (до 3-х), які одночасно передають повідомлення на МС, та в кожному кадрі обирати кращий сигнал; це також забезпечує м'який режим «естафетної передачі»;

- для зниження взаємних завад у системі *CDMA* і, отже, збільшенню її ємності, є застосування, аналогічно до *GSM*, системи переривчастої передачі мови (випромінювання сигналу мобільною станцією тільки на інтервалах активності мови) на основі використання детектора активності мови, вокодера з алгоритмом *CELP* і перемінної швидкості перетворення аналогового мовного сигналу в цифровий (на інтервалі сеансу зв'язку активна частина розмови складає близько 35%, а 65% припадає на прослуховування повідомлень з протилежної сторони і паузи).

20. Проектування мереж стільникового зв'язку.

20.1. Цілі та завдання проектування

Проектування – один з найбільш складних і відповідальних етапів розгортання мереж стільникового зв'язку, оскільки він повинен забезпечити можливо більш близьку до оптимального побудову мережі за *критерієм ефективність - вартість*.

Цілі проектування:

- визначити місця установки базових станцій (БС) ;
- розподілити наявні частотні канали між стільниками (скласти *територіально-частотний план* відповідно до принципу повторного використання частот) таким чином, щоб забезпечити обслуговування стільниковим зв'язком заданої території з необхідною якістю при мінімальній кількості БС, тобто при мінімальній вартості інфраструктури мережі.

Фактично це завдання дуже складне. З одного боку, надмірно часте розміщення БС не вигідне, тому що спричиняє невиправдані витрати. З іншого боку, занадто рідке розташування БС може привести до появи ділянок території, що не обслуговуються, а це неприпустимо. Завдання додатково ускладнюється труднощами аналітичної оцінки характеристик поширення сигналів і розрахунку напруженості поля, а також необхідністю обліку нерівномірності трафіку в межах території, що обслуговується.

Конфігурація і параметри мережі істотно залежать від умов місцевості (рельєфу, характеристик забудови і т.п.) і в ході розробки проекту доводиться виконувати великий обсяг розрахунків, що вимагають інтенсивного використання обчислювальних засобів.

Порядок проектування:

- *створюється електронна карта території*, тобто здійснюється перенос в комп'ютер топографічної карти місцевості з усіма параметрами і характеристиками, важливими для складання проекту;
- з урахуванням характеристик запланованої до використання апаратури і результатів наближеної оцінки енергетичного балансу виконується *попереднє проектування стільників мережі і позицій БС*;
- для отриманої схеми з використанням існуючих моделей поширення радіохвиль і характеристик місцевості *більш точно розраховуються параметри електромагнітного поля в межах території*, що обслуговується, що дозволяє оцінити якість покриття;
- для тієї ж схеми складається *територіально-частотний план* (розподіл частотних каналів по стільниках відповідно до принципу повторного використання частот);

- оцінюється трафік і ємність для характерних ділянок і в мережі в цілому;
- якщо за якими-небудь показниками (якість покриття, трафік, ємність) складена схема мережі не задовольняє висунутим вимогам, *проводиться її корегування*, і для уточненої схеми зазначені вище розрахунки повторюються;
- *проводяться експериментальні виміри характеристик електромагнітного поля*, і за результатами вимірів схема мережі також корегується; необхідний обсяг експериментальних вимірів і частота їх повторення визначаються на підставі досвіду проектувальників.

Таким чином, *процес проектування є ітераційним, а остаточна якість проекту оцінюється вже на етапі експлуатації мережі*, де також неминучі його корегування і доробка, особливо на самому початку роботи, коли виконується налаштування й оптимізація мережі. Цей етап роботи фактично являється найбільш трудомістким. Доробки проекту потрібні по мірі розвитку й удосконалювання мережі, для підвищення її якості.

20.2. Методи проектування мереж стільникового зв'язку

Якість послуг, наданих мережею стільникового зв'язку, багато в чому визначається характеристиками її підсистеми БС.

У процесі планування мережі БС вирішуються наступні завдання:

- забезпечення радіопокриття території, на якій повинні надаватися послуги зв'язку;
- побудова мережі, ємності якої буде достатньою для обслуговування створеного абонентами трафіку з припустимим рівнем перевантажень;
- оптимізація рішення зазначених вище завдань (з використанням мінімального числа мережевих підсистем і елементів) протягом усього життєвого циклу мережі.

Без рішення перерахованих завдань не можливе забезпечення високої якості наданих послуг.

Відповідно до визначення Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ), під *якістю обслуговування* розуміють «*сукупний ефект від надання послуг, що визначає ступінь задоволення ними абонента*». Крім технічних аспектів якості роботи мережі в це визначення включені й аспекти, пов'язані з наданням додаткових послуг (наприклад, таких, як передача коротких повідомлень), вартістю обслуговування, ціною і якістю роботи мобільних терміналів і т.п.

При оцінці результатів планування мережі для аналізу технічних аспектів якості її роботи, як правило, використовують наступні основні (рекомендовані МСЕ) параметри:

- *ймовірність блокування виклику* через недолік ресурсів мережі;

- ймовірність розриву з'єднання через неуспішну спробу міжстільникового переключення зв'язку (хендовера);
- інтервал часу між передачею запиту на встановлення з'єднання терміналом, який викликає, і закінченням процедури встановлення з'єднання;
- інтервал часу між передачею терміналом запиту на роз'єднання з'єднання й одержанням ним підтвердження про роз'єднання.

Саме ці параметри безпосередньо впливають на ступінь задоволення абонента роботою мережі і залежать від безлічі інших параметрів (більш низького рівня), що характеризують роботу мережевих елементів.

Протягом усього життєвого циклу мережі число її абонентів, обсяг трафіку і його розподіл по території, що обслуговується, постійно змінюються. Крім того, існують сезонні (періодичні) зміни обсягу трафіка і його територіального розподілу. Конфігурація мережі БС повинна адаптуватися до змін, що відбуваються, тому її *планування – це безупинний процес*.

При плануванні мережі можна виділити наступні етапи:

- планування радіопокриття;
- планування ємності;
- частотне планування;
- аналіз роботи й оптимізація мережі.

Такий поетапний розподіл у значній мірі умовний, тому що всі етапи тісно взаємозалежні між собою. Послідовність етапів планування мережі БС показана на рис. 20.1.



Рис. 20.1. Етапи планування мережі базових станцій

На етапі планування радіопокриття визначається мінімально необхідне число БС (стільників), їхнє оптимальне розташування на місцевості і радіотехнічні параметри для забезпечення радіопокриття заданої території з необхідним рівнем потужності радіосигналу, який приймається мобільним терміналом (МТ).

Основною вхідною інформацією для планування радіопокриття є наступні відомості:

- вимоги до якості послуг зв'язку;
- характеристики території, на якій необхідно надавати ці послуги;
- технічні характеристики устаткування БС і МТ.

На даний час для планування радіопокриття широко застосовують спеціальні комп'ютерні системи планування стільників, які:

- визначають межі макро- і мікростільників розрахунковими методами, використовуючи для цього різні моделі поширення радіохвиль і цифрові географічні карти, на яких врахований рельєф і характер місцевості;

- аналізують електромагнітну сумісність (ЕМС) БС;

- планують їхню ємність, виконують частотне планування і т.п.

Результати планування радіопокриття, які отримуються з використанням таких систем, уточнюються за даними вимірів характеристик радіоканалу на етапі оптимізації мережі, що підвищує точність і ефективність планування.

Метою планування ємності мережі є визначення необхідного числа прийомопередавачів у кожному її стільнику.

Вхідною інформацією для цього етапу служать:

- припустимий відсоток блокувань викликів у мережі БС (вимоги по якості наданих послуг);

- діапазони частот, який виділений оператору стільникової мережі;

- прогноз обсягу трафіку і числа абонентів у мережі;

- результати планування радіопокриття.

Для оцінки ємності стільникової мережі звичайно використовується модель Ерланга-В. За допомогою її визначається ймовірність відмов в обслуговуванні при заданому числі каналів і обсягу трафіку.

Планувати ємність мережі складніше всього на початковому етапі її будівництва, коли ще не накопичені відомості про її роботу за досить тривалий термін часу, що необхідно для більш точного прогнозування обсягу трафіку, з обліком його територіального розподілу.

Частотне планування вирішує завдання визначення номерів частотних каналів для кожного прийомопередавача в мережі (частотний план) і максимізації ємності мережі при обмеженому частотному ресурсі, припустимому рівні внутрішньомережєвих завад (співканальних, по сусідньому каналу тощо) і необхідній якості роботи мережі БС.

Вхідною інформацією для частотного планування є наступні відомості:

- діапазони частот, дозволених для використання;

- результати планування радіопокриття і розрахунку ЕМС БС у мережі;

- результати планування ємності мережі БС;

- відомості про наявність зовнішніх джерел радіозавад та ін.

Основний принцип побудови стільникової мережі – це багаторазове використання того ж самого частотного каналу в різних стільниках. Воно дозволяє економічно використовувати частотний спектр і будувати

мережі з дуже великою ємністю, у яких щільність трафіку, що обслуговується, досягає 100 Ерл/км² і більше. Проте сьогодні в ряді країн світу через дуже високу щільність трафіку в діючих мережах забезпечення високої якості їхньої роботи є серйозною проблемою. Для її вирішення існують спеціальні технології, такі, як *SFH*, *MRP* та ін. Вони значно підвищують ефективність використання частотного спектру.

На етапах планування радіопокриття і ємності мережі, а також її частотного планування, розраховуються тільки основні параметри БС. Вони визначають розміри стільників, їхню ємність і параметри основних типів хендоверів. Іншим мережевим параметрам (таким, як параметри додаткових типів хендоверів, засобів керування випромінюваною потужністю БС і МТ і т.д.) кожна компанія-оператор, як правило, призначає стандартні значення для різних типів стільників: макро- і мікростільників у межах міста, макростільників у сільській місцевості і т.д. Ці значення визначаються в процесі експлуатації мережі БС, у результаті проведення спеціальних експериментів і залежать від її топології. Вони встановлюються в нових БС за умовчанням (при їхньому запуску в експлуатацію), при необхідності на етапі наступної оптимізації роботи мережі здійснюється їхнє підстроювання.

Під оптимізацією розуміють зміну структури мережі БС і її параметрів для досягнення визначених цілей. На різних етапах життєвого циклу мережі такі цілі різні. Наприклад, ними можуть бути збільшення ємності мережі, підвищення якості обслуговування абонентів, підвищення ефективності використання частотного спектру й ін.

Процес оптимізації мережі містить у собі кілька послідовних етапів:

1. Порівняння планової конфігурації мережі (розробленої в ході її планування) з існуючою. Остання визначається з урахуванням відмови устаткування, тимчасових змін конфігурації та параметрів БС і т.д. Планова і існуюча конфігурації ідентичні лише в ідеальному випадку, у реальній мережі вони завжди трохи розрізняються. Одне із завдань планування – виявити ці розходження, а при необхідності й усунути їх.

2. Збір даних про роботу мережі. Основними джерелами інформації про роботу мережі БС є: центр експлуатації і технічного обслуговування (ОМС), радіоінтерфейс, інтерфейс *A-bis* (між БС і їх контролерами), побажання і скарги абонентів. Для збору даних з радіоканалу й інтерфейсу *A-bis* існують спеціальні вимірювальні системи і прилади, що дозволяють проводити попередній аналіз роботи мережі.

3. Аналіз роботи мережі, планування змін її конфігурації і параметрів. Роботу мережі аналізують на підставі припустимих значень ключових параметрів, що визначають якість її роботи. Крім параметрів, рекомендованих МСЕ, у цей перелік можуть входити і деякі інші (наприклад, відсоток розірваних з'єднань). При аналізі порівнюють їх виміряні і припустимі значення. У випадку їхньої невідповідності

визначаються можливі причини погіршення роботи і способи її поліпшення.

4. Корегування конфігурації і параметрів мережі. Після цього етапу оптимізації мережі знову аналізується її робота й оцінюється ефективність зроблених корегувань.

20.3. Планування ємності мережі

Як було вказано раніше, при плануванні ємність мережі визначається кількістю прийомопередавачів (каналів) базових станцій, яка залежить від кількості абонентів ($N_{аб}$), інтенсивності поступаючих викликів(λ), середньої тривалості розмови ($T_{розм}$), імовірності відмов ($P_{відм}$) у наданні каналу тощо.

Оцінка телекомунікаційного трафіку у час найбільшого навантаження дозволяє визначити кількість необхідних каналів в мережі.

Телефонне навантаження - це випадкова величина, яка визначається кількістю викликів, що поступають в мережу від абонентів за одиницю часу, і часом обслуговування кожної розмови (встановлення зв'язку, надання їм каналу зв'язку на час переговорів, роз'єднання). Найважливішою характеристикою телефонного навантаження є *інтенсивність навантаження*, яка дорівнює добутку математичного очікування кількості викликів (λ), що поступають в одиницю часу, на середній час обслуговування однієї розмови ($T_{розм}$):

$$Y = \lambda \cdot T_{розм}, \text{ Ерл}$$

Примітка: значення λ та $T_{розм}$ повинні бути приведені до одиниць часу у **годинах**. Якщо середня тривалість зайняття каналу(розмови) - $T_{розм}$ (хвил.), а максимальна кількість викликів в одному стільнику – λ_0 (викл/год.), то навантаження, яке створюють всі абоненти розраховують наступним чином:

$$Y_0 = (\lambda_0 \cdot T_{розм}):60, \text{ Ерл}$$

Одиницею виміру телефонного навантаження є 1 *Ерланг* (1 Ерл = 36 CCS, де CCS - *Hundred call seconds*). Навантаження в 1 Ерланг відповідає безперервному використанню одного каналу на протязі однієї години.

Судьба викликів абонентів, для яких не знайшлося вільних каналів залежить від системи організації зв'язку, яка реалізована в мережі:

- без втрат;
- з явними втратами;
- з очікуванням;
- із повтором тощо.

Для простішого потоку викликів з інтенсивністю навантаження(Y) та явними втратами імовірність відмови може бути розрахована по формулі Єрланга-В, яка ще називається першим розподіленням Єрланга.

Рішення цієї формули відображається у таблицях Ерланга. Одиницями виміру імовірності відмов є *відсотки*(%), або *промиле*($^0/_{00}$), причому $10 \text{ ‰} = 1 \%$.

Якщо задана імовірність відмов, то по таблицям Ерланга можна знайти необхідну кількість каналів, що дозволяє з урахуванням застосованої технології множинного доступу та принципу формування фізичних каналів визначити кількість частотних радіоканалів.

Задач №1. Максимальна кількість викликів в одному стільнику (λ_0) дорівнює 1000 викл/год, середня тривалість розмови – 2 хвил.

Визначити кількість фізичних каналів, при якій імовірність відмов не перевищить 1%.

Задач №2. Для комірки стільникової мережі GSM виділено 8 частотних радіоканалів, щоб обслуговувати виклики абонентів з середньою тривалістю 150 сек.

Яка кількість викликів у годину буде обслуговуватися при імовірності відмов 2%?

Задач №3. Розрахувати максимально допустимий радіус стільника мережі GSM, яка розгорнута на території 450 кв.км з потенціальною кількістю абонентів – 25000, навантаженням від одного абонента – 0,02 Ерл, імовірністю відмов – 1% та кількістю радіоканалів в одному стільнику – 3.

21. Розрахунок зони радіодоступу в стільникових мережах

21.1. Загальні положення.

Оцінки зони радіодоступу з урахуванням різних факторів електродинаміки можуть виконуватися на основі:

- строгої теорії поля;
- наближених математичних виразів;
- великої кількості феноменологічних моделей і емпіричних формул, заснованих на статистичному підході.

При проектуванні стільників мобільної мережі рівень сигналу в місці розташування мобільного терміналу розраховується як різниця потужності $P_{\text{прд}}$, яка випромінюється в напрямку МС, і втрат L при поширенні радіосигналу.

Існує досить велика кількість математичних моделей і методів, як правило, емпіричних, які дозволяють робити розрахунок основних втрат при розповсюдженні сигналу для різних умов поширення як для макростільників, так і для мікростільників. Серед цих моделей, що знайшли широке застосування на практиці, варто виділити моделі на основі *Рекомендації № 370-5 МККР (ССІР)*, моделі прогнозування втрат Альсбрука-Парсона, Окамура - Хата, Уолфіша-Ікегамі, Лі, Кся-Бертоні, Енглі, Бломквіста-Ладелла і ряд інших.

21.2. Математичні моделі для розрахунку втрат при розповсюдженні сигналу.

Рекомендація № 370-5 МККР (ССІР) є однією із перших методик розрахунку очікуваної дальності для сухопутних систем зв'язку й поряд з моделями Окамура-Хата, Альсбрука-Парсона лежить в основі спеціалізованих геоінформаційних систем автоматизованого частотно-територіального планування мереж мобільного радіозв'язку.

Напруженість поля сигналу в мережах рухомого радіозв'язку (МРР), будучи випадковою величиною, по місцю розташування й у часі, як уже було показано вище, апроксимується логарифмічно нормальним законом, параметрами якого є медіанне значення напруженості поля по місцю розташування та у часі (дБ (мкВ/м)) і стандартне відхилення (дБ щодо медіани).

Медіанне значення напруженості поля сигналу знаходять із “кривих поширення” Рекомендації № 370-5 і 529 МСЕ, які являють собою функціональну залежність

$$E_0 = f(R, f, h_{\text{бс}}, T),$$

де R – довжина траси, км;

f – робоча частота (діапазон частот), МГц;

$h_{\text{бс}}$ – ефективна висота передавальної антени БС, м;

T – час, протягом якого напруженість поля перевищує прогнозований рівень, %.

У 2001 р. затверджена *Рекомендація Р.1546* сектора радіозв'язку *ITU-R*, яка застосовується для діапазону частот від 30 до 3000 МГц і визначає метод прогнозування середнього рівня сигналу при поширенні над земною, морською і змішаною поверхнею. Рекомендація містить криві прогнозування рівня поля, які використовуються в розрахунках, і процедуру застосування даної рекомендації для конкретних умов. Графіки рівня сигналу були отримані в результаті статистичної обробки даних численних вимірів. Вони надають інформацію про рівень сигналу як функції відстані та ефективної висоти антени передавача. Рекомендація містить графіки для різних діапазонів частот і для значень рівня сигналу, що перевищують на 50 %, 10% і 1% час спостереження.

Таким чином, криві поширення, які передбачені *Рекомендацією Р.1546*, представляють собою залежність напруженості поля від різних параметрів. Криві поширення відображають значення напруженості поля, яке створюється джерелом потужністю 1 кВт, випромінюється напівхвильовим диполем, в більш, ніж 50% місцевості (у межах будь-якої зони, приблизно 200×200 м) для різного відсотка часу (50%, 10%, 5%, 1%). Вони відповідають різним висотам передавальної антени та висоті приймальної антени 10 м. Криві поширення надані для ефективних висот передавальної антени від 37,5 до 1200 м, де кожне наступне значення “ефективної висоти” дорівнює подвоєному попередньому значенню. Для значень ефективної висоти, відмінних від розглянутих, повинна застосовуватися лінійна інтерполяція двох кривих, що відповідають ефективним висотам безпосередньо вище та нижче розглянутого значення. Криві трас, що проходять над поверхнею Землі, відносяться до значення $\Delta h = 50$ м, яке звичайно застосовується до горбистої території.

На розмір зони обслуговування впливають флуктуаційні шуми й взаємні завади між станціями. Ці завади нормують і враховують за допомогою наступних параметрів:

1. Мінімальна напруженість поля E_{min} – рівень напруженості електромагнітного поля, необхідний для прийому із задовільною якістю в присутності шумів, але у відсутності взаємних завад. Для забезпечення належної якості прийому сигналів повинні виконуватися умови:

$$U_{min} \geq (U_m + c/\omega),$$

де U_{min} – мінімальний рівень сигналу на вході приймача;

U_m – сумарна напруга всіх видів шумів;

c/ω – відношення сигнал/шум на високій частоті.

2. Необхідна напруженість поля $E_{необх}$ – рівень напруженості електричного поля, необхідний для прийому із заданою якістю в присутності шумів і взаємних завад. На відстані R від БС поточне значення напруженості змінюється за випадковим законом, тому приблизно приймають, що на межі зони обслуговування поле, яке

створюється передавачем, у часі змінюється мало, а зони обслуговування БС – перекриваються.

Вихідною інформацією для розрахунку випромінюваної потужності є поздовжні профілі та морфоструктура місцевості (рослинність, тип і площа забудови й т.п.), висота установки антени і її просторова орієнтація, довжина й характеристики кабелю, втрати в передавальному й антенно-фідерному тракці, діаграма спрямованості антени (у горизонтальній і вертикальній площинах), коефіцієнт підсилення антени та деякі поправочні коефіцієнти. При визначенні ступеня впливу морфоструктури враховують тільки такі забудови й рослинність, які попадають у побудовану уздовж лінії поширення першу зону Френеля.

Для кожної БС будується растрова карта радіопокриття, що містить для будь-якого місця регіону інформацію про рівень її сигналу. Для міських умов радіопокриття розраховується з дискретом 50 м, для замиських умов – 100...120 м.

Нерівномірність рельєфу місцевості характеризують параметром Δh для не менше, ніж восьми напрямків від місця установки БС. Параметр Δh визначається по профілю траси як різниця рівнів місцевості, що перевищуються на 10% і 90% довжини ділянки із заданою довжиною в обраному напрямку. Груба оцінка значення Δh може бути знайдена по різниці ΔH максимальної і мінімальної висотних відміток місцевості на трасі поширення: $\Delta h \cong 0,43 \cdot \Delta H$.

Ефективне значення напруженості поля E_0 , мкВ/м на відстані R_0 між точками передачі та прийому в умовах вільного простору визначається в такий спосіб:

$$E_0 = 222 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{P_0}{R_0}}, \quad (1)$$

де P_0 – ефективно випромінювана потужність передавача БС, кВт;

R_0 – відстань, км;

$$P_0 = P_{\text{ПЕР}} \cdot G_{\text{ПЕР}} \cdot \eta_{\text{ПЕР}}, \quad (2)$$

де $P_{\text{ПЕР}}$ – потужність передавача БС, кВт;

$G_{\text{ПЕР}}$ – коефіцієнт підсилення антени БС щодо напівхвильового вібратора;

$\eta_{\text{ПЕР}}$ – ККД передавального антенно-фідерного тракту.

Множник ослаблення поля вільного простору V , дБ (враховуючий ослаблення E_0 через вплив Землі, атмосфери й т.п.):

$$V = 20 \lg(E/E_0); \quad (3)$$

$$\frac{E}{E_0} = \frac{4\pi \cdot R_0 \sqrt{P_{\text{пр}}}}{\lambda \sqrt{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}}}}, \quad (4)$$

де $P_{\text{пр}}$ – потужність сигналу на вході приймача;

$P_{\text{ПЕР}}$ – потужність сигналу на виході передавача;

$G_{\text{ПЕР}}, G_{\text{ПР}}$ – коефіцієнти підсилення передавальної й приймальної антени;

$\eta_{\text{ПЕР}}, \eta_{\text{ПР}}$ – ККД передавального і приймального тракту;

E – напруженість поля в реальних умовах.

Діюча висота приймальної антени, м:

$$h_{\text{д}} = \lambda \sqrt{1,64 \cdot G \cdot Z \cdot \eta / 120} / 2\pi, \quad (5)$$

де G і η – коефіцієнт підсилення і ККД приймальної антени по потужності щодо напівхвильового вібратора,

Z – хвильовий опір фідера, Ом;

λ – довжина хвилі, м.

Так, для фідера з $Z = 75$ Ом:

$$h_{\text{д}} = \lambda \sqrt{G \cdot \eta} / 2\pi, \text{ м} \quad \text{або}$$

$$h_{\text{д}} = (20 \lg \lambda + G + \eta - 16), \text{ дБ/м}$$

Необхідно відзначити, що існує спосіб попередньої оцінки мінімальної напруженості поля сигналу для МС у транкінговій мережі:

$$E_{\text{min}} = (E_{\text{АС}} + k_0 \sigma - P_{\text{эф}} + B_{\text{рельєф}} + B_{\text{h2}} + B_{\text{БС}}), \text{ дБ/мкВ/м},$$

$$E_{\text{АС}} = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{пр}}}{l_{\text{д}}} \right), \text{ дБ}, \quad (6)$$

де $U_{\text{пр}}$ – чутливість приймача, мкВ;

$l_{\text{д}}$ – діюча висота приймальної антени, м;

k_0 – коефіцієнт логонормального розподілу, що залежить від необхідної надійності зв'язку за часом P_{T} і місцю P_{D} (див. табл. 21.1);

$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{D}}^2 + \sigma_{\text{T}}^2}$, де σ_{D} і σ_{T} – стандартні відхилення сигналу за часом і місцем, дБ (див. табл. 21.2);

$B_{\text{рельєф}}$ – поправка на нерівномірність рельєфу місцевості, дБ (визначається відповідно до рекомендацій МККР 370-5);

B_{h2} – поправка на зниження антени АС від висоти 10 м, дБ (визначається відповідно до рекомендацій МККР 370-5);

$B_{\text{БС}}$ – поправка на зменшення коефіцієнта підсилення антени БС для обраного напрямку, дБ;

$P_{\text{эф}}$ – ефективно випромінювана щільність передавача БС, дБ:

$$P_{\text{эф}} = P_{\text{ПЕР}} - \Delta e_{\text{к}} - \Delta e_{\text{F}} + G_{\text{ПЕР}}, \quad (7)$$

де $P_{\text{ПЕР}}$ – потужність передавача БС, дБкВт;

$\Delta e_{\text{к}}$ – втрати в комбайнері, дБ;

Δe_{F} – втрати у фідері, дБ;

$G_{\text{ПЕР}}$ – коефіцієнт підсилення антени БС щодо напівхвильового вібратора, дБ.

Логарифмічно нормальний розподіл

Таблиця 21.1.

P_T, P_D	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99
K_0	-2,3	-1,64	-1,28	-0,84	-0,53	0	0,53	0,84	1,28	1,64	2,3

Стандартні відхилення сигналу

Таблиця 21.2.

Смуга частот, МГц	σ_D , дБ			σ_T , дБ				
	$\Delta h = 50$	$\Delta h = 150$	$\Delta h = 300$	d, км	50	100	150	175
300.....3000	10	15	18			2	5	7

Припустима напруженість [дБ/мкВ/м] поля завад, які створюються БС:

$$E_{\text{доп завад}} = E_{AC} + k_0\sigma - (A_0 + K_E\sigma_E) - P_{\text{еф}} + B_{\text{рел'еф}} + B_{h2} + B_{BC}, \quad (8)$$

де K_E – коефіцієнт логонормального розподілу;

$$\sigma_E = \sqrt{2\sigma_D^2 + 2\sigma_T^2};$$

A_0 – захисне відношення.

Рекомендацією № 370 визначена методика розрахунку очікуваної дальності. Рівень поля корисного сигналу в точці прийому повинен перевищувати рівень шуму в точці прийому на задану величину (с/ш) на вході приймача:

$$E_{\text{необх}} = (N_{\text{ш}} + (с/ш)_{\text{вх}} + B_{\text{екв}} + B_{h2} + B_{\text{завм}} + B_{\text{рельеф}} - \sigma_{\text{пр}}), \text{ дБ/мкВ/м}, \quad (9)$$

де $N_{\text{ш}}$ – рівень зовнішніх завад і шумів і внутрішніх шумів приймача, наведених до крапки прийому, дБ (тобто $N_{\text{ш}} = \bar{E}_{\text{п еф}}$ – середнє ефективне значення напруженості поля сумарних завад);

$(с/ш)_{\text{вх}}$ – відношення сигнал/шум на вході приймача, що відповідає заданому відношенню (с/ш) на виході приймача, дБ;

$B_{\text{екв}}$ – поправка, що враховує відмінність еквівалентної потужності передавача від потужності 1 кВт (для якої складені криві МККР), дБ;

B_{h2} – поправка, що враховує відмінність висоти приймальної антени від висоти 10 м, дБ;

$B_{\text{завм}}$ – поправка, що враховує відмінність еквівалентної потужності передавача від потужності 1 кВт (для якої складені криві МККР), дБ;

B_{h2} – поправка, що враховує відмінність висоти приймальної антени від висоти 10 м, дБ;

$B_{\text{завм}}$ – поправка на швидкі завмирання сигналу, дБ;

$\sigma_{пр}$ – нерівномірність діаграми спрямованості приймальної антени в горизонтальній площині, дБ;

$V_{рельєф}$ – поправка, що враховує рельєф місцевості. Для точних обчислень по радіусах від БС через 15...30° будують поздовжні профілі місцевості й визначають середні коливання Δh оцінок висот, потім відповідно до кривих МККР вносять поправку $V_{рельєф}$ для кращого і гіршого випадків коливань Δh :

$$E_{п\ еф} = N_{ш} = 10 \lg \left[N_{зовн}^2 + \frac{U_{пр}^2 (\beta \cdot l)_{пр}^2}{(с/ш)_{вх}^2 \cdot h_{д}^2} \right], \text{ дБ/мкВ/м}, \quad (10)$$

де $N_{зовн} = (E_{н\ еф}^2 + E_{а\ еф}^2 + E_{к\ еф}^2)$ – рівень зовнішніх шумів у місці прийому, (складається з ефективних значень напруженості поля індустриальних завод, атмосферних завод і космічних шумів);

$U_{пр}$ – номінальна чутливість приймача;

$(с/ш)_{вх}$ – номінальне відношення сигнал/шум на вході приймача для заданої чутливості приймача;

$(\beta l)_{ін.}$ – погонне загасання в антенному тракті приймача. Коефіцієнт загасання β визначається за довідником для заданого кабелю та робочої частоти, дБ/м;

l – довжина фідера, м;

$h_{д}$ – діюча висота приймальної антени, м.

Поправка на еквівалентну потужність передавача:

$$V_{екв} = V_{P\ ном} + V_{АФТ} + (\beta^* l)_{пер} - G_{пер} - \sigma_{пер}, \text{ дБ}, \quad (11)$$

де $V_{P\ ном} = 10 \lg(1000/P_{пер})$ – поправка, що враховує відмінність номінальної потужності передавача $P_{пер}$ від потужності 1 кВт (для якої складені криві МККР), дБ;

$V_{АФТ}$ – загасання в резонаторних і мостових фільтрах, антенних роздільниках і неоднорідностях антенно-фідерного тракту передачі, дБ;

$(\beta^* l)_{пер}$ – погонне загасання у фідері передавальної антени, дБ;

$\sigma_{пер}$ – нерівномірність діаграми спрямованості в горизонтальній площині, прийнятої рівної ± 3 дБ;

$G_{пер}$ – коефіцієнт підсилення передавальної антени, дБ.

Для відношення с/ш на вході приймача справедливе вираження:

$$(с/ш)_{вх} = (с/ш)_{вих} F_{max} / \Delta f \sqrt{3}, \text{ відн. од.}, \quad (12)$$

де F_{max} – максимальна звукова частота модуляції, кГц;

Δf – девіація частоти на канал, кГц.

Індекс модуляції $m = \Delta f / F_{max}$; отже, відношення

$$(с/ш)_{вх} = (с/ш)_{вих} / \sqrt{3} * m.$$

Модель Альсбрука - Парсона дозволяє визначити основні втрати передачі в діапазоні (75...450) МГц у такий спосіб:

$$L = L_F + \left((L_P - L_F)^2 + L_D^2 \right)^{1/2} + L_B + \gamma, \quad (13)$$

де $L_F = (32,45 + 20 \lg f + 20 \lg R)$ – втрати передачі у вільному просторі, дБ (f – робоча частота, МГц,

R – відстань між антенами базової й мобільної станцій, км);

L_D – дифракційні втрати, дБ, обумовлені характером рельєфу місцевості під міською забудовою (сферичністю землі, наявністю горбистої місцевості й т.п.), причому ці втрати розраховуються в припущенні відсутності забудови кожним з відомих методів, наприклад, описаних вище;

L_P – втрати поширення над плоскою землею (при необхідності з урахуванням атмосферної рефракції), дБ.

У більшості випадків L_P можуть бути обчислені за формулою:

$$L_P = 120 - 20 \lg h_M - 20 \lg h_B + 40 \lg R, \quad (14)$$

де h_M і h_B – висоти мобільної й базової антен, м.

Втрати, викликані наявністю міської забудови, дБ:

$$L_B = 20 \lg \left(\frac{h_0 - h_M}{\sqrt{d\lambda}} \right) + 16, \quad (15)$$

де λ – довжина хвилі, м;

d – ефективна ширина вулиці, на якій розташована мобільна антена, м;

γ – поправочний коефіцієнт, що залежить від частоти.

Модель Уолфіша-Ікегамі визначає медіанне значення втрат передачі L_0 , дБ за формулою:

$$L_0 = L_1 + L_2 + L_3 \quad (16)$$

де $L_1 = 32,4 + 20 \lg(Rf)$ – втрати при поширенні у вільному просторі;

$L_2 = -16,9 - 10 \lg(w) + 10 \lg f (h_{d1} - h_2) + L_P$ – втрати за рахунок відбиттів від будинків;

$w = 10 \dots 15$ м – ширина вулиці;

L_P – втрати, обумовлені орієнтацією вулиць щодо напрямку приходу сигналу:

$$L_P = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi, & \text{коли } 0 \leq \varphi < 35^\circ; \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35^\circ), & \text{коли } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 + 0,114(\varphi - 55^\circ), & \text{коли } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ, \end{cases} \quad (17)$$

де φ – орієнтація вулиці щодо напрямку приходу хвилі.

$$L_3 = L_c + K_a + K_d \lg R + K_f \lg f - 9 \lg d,$$

$$\text{де } L_c = \begin{cases} 18 \lg(1 + (h_1 - h_{d1})), & \text{коли } h_1 > h_{d1}, \\ 0, & \text{коли } h_1 \leq h_{d1}; \end{cases} \quad (18)$$

h_{d1} – середня висота прилеглих до БС будинків;

d – відстань між будинками.

$$K_a = \begin{cases} 54, & \text{коли } h_1 > h_{d1}; \\ 54 - 0,8(h_1 - h_{d1}), & \text{коли } R \geq 0,5 \text{ км и } h_1 \leq h_{d1}; \\ 54 - 0,4(h_1 - h_{d1})R, & \text{коли } R < 0,5 \text{ км и } h_1 \leq h_{d1}; \end{cases}$$

$$K_d = \begin{cases} 18, & \text{коли } h_1 > h_{d1}; \\ 18 - 15(h_1 - h_{d1})/h_{d1}, & \text{коли } h_1 \leq h_{d1}; \end{cases}$$

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0,7(f/925 - 1) & \text{для міста середніх розмірів і приміст;} \\ -4 + 1,5(f/925 - 1) & \text{для великого міста.} \end{cases}$$

Модель Лі була запропонована в 1982 р. У досить короткий час вона стала популярною серед дослідників і системних інженерів, оскільки параметри моделі можуть бути просто скорельовані за допомогою додаткових натурних вимірів до конкретних умов поширення. Після проведення цієї процедури прогнозування рівень сигналу стає досить точним. Більше того, алгоритм прогнозування простий для застосування й легко обчислюється. Багато систем мобільного зв'язку спроектовані із застосуванням цієї моделі (*AMPS, DAMPS, GSM, IS - 95*).

Модель складається із двох частин. Перша частина (регіон - регіон) використовується для прогнозування втрат при поширенні над відносно плоскою поверхнею без прийняття до уваги територіальних особливостей. Використання тільки цієї частини приводить до недостатньо точних результатів для горбистих територій. Друга частина (точка - точка) моделі Лі використовує результат, отриманий у першій частині, за основу й одержує точніше прогнозування. Заснована на даних профілю поверхні друга частина моделі враховує, чи задовольняється умова прямої видимості. Якщо пряма видимість між приймачем і передавачем існує, то враховується вплив відбитих радіохвиль.

Основна частина втрат при поширенні може бути виражена наступною формулою:

$$P_r = P_{r0} (r/r_0)^{-\gamma} (f/f_0)^{-n} \alpha_0, \quad (19)$$

де P_r - потужність сигналу у ватах на відстані r від передавача;

f - частота сигналу;

P_{r0} - потужність сигналу в місці перетинання лінії поширення з перешкодою на відстані r_0 від передавача;

γ - враховує ступінь кривизни поверхні;

n - показує ступінь частотної залежності;

α_0 - поправочний коефіцієнт, який залежить від висоти установки антен, потужності передавача, коефіцієнтів підсилення передавальної й приймальної антен.

Ця модель може бути застосована для більш загального випадку, коли радіохвилі поширюються в різних умовах. У цьому випадку мають бути відомими коефіцієнти кривизни поверхонь γ_i і межі областей з такими коефіцієнтами кривизни. Дана модель дозволяє визначити потужність прийнятого сигналу в дБм і виражається співвідношенням:

$$P_{\text{пр}} = A - B \log R - n \log \left(\frac{f}{900} \right) + 10 \log \alpha, \quad (20)$$

де параметри A і B залежать від характеристик навколишнього середовища й були визначені статистично по вимірах у ряді міст. Для великих міст $A = 55 \dots 80$, $B = 30 \dots 43$. Для приміст $A = 54$, $B = 39$. Множник $n = 2$ для приміст і для діапазону $f < 450$ МГц, $n = 3$ для міст і для $f < 450$ МГц. Параметр α обчислюється в такий спосіб:

$$\alpha = \frac{h_B^2 h_M^m P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}}}{3660}, \quad (21)$$

де $P_{\text{прд}}$ - потужність передавача, Вт;
 $G_{\text{прд}}$, $G_{\text{прм}}$ - коефіцієнти підсилення антен;
 h_M і h_B - висоти антен базової й мобільної станцій;
 $m = 1$ при $h < 3$ м і $m = 2$ при $h < 10$ м.

Модель **Кся-Бертоні** дозволяє врахувати ряд додаткових параметрів, пов'язаних з поверховістю будівель, шириною вулиць і ін. Дана модель являє собою дифракційну аналітичну модель, розроблену для розрахунків загасань на трасах систем рухомого радіозв'язку в міських і приміських зонах. На відміну від статистичної моделі Окамури-Хати, дозволяє вести розрахунки в більш широкому діапазоні частот (до 2200 МГц). Модель побудована на основі рівнянь хвильової оптики й розглядає різні механізми поширення радіохвиль в умовах міської забудови: поширення у вільному просторі, дифракцію на краю дахів будинків, відбиття від стін будинків і ін.

Коли антена БС розташована вище середнього рівня дахів будинків (рис. 21.1), то з БС на МС приходять два промені: один - у результаті дифракції на краю даху будинку, другий - після перевідбиття від стіни. Величина середніх втрат у цьому випадку:

$$L = -101g \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \right] - 101g \left[\frac{\lambda}{2\pi r} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 101g \left(2,35^2 \left[\frac{\Delta h_B}{R} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \right]^{1,8} \right), \quad (22)$$

де λ - довжина хвилі;
 R - відстань між БС і МС;
 $\Delta h_B = h_{BS} - h_0$ - різниця висот антени БС і середнього рівня дахів;
 $\theta = \tan^{-1}(\Delta h_M/x)$,
 $\Delta h_M = h_0 - h_{MC}$ - різниця висот середнього рівня дахів і антени МС;
 x - відстань по горизонталі між МС і краєм даху, на якій дифрагує хвиля;
(звичайно $x = w/2$, где w - середня ширина вулиць);
 $r = \sqrt{\Delta h_M^2 + x^2}$;
 d - середній інтервал між кварталами.

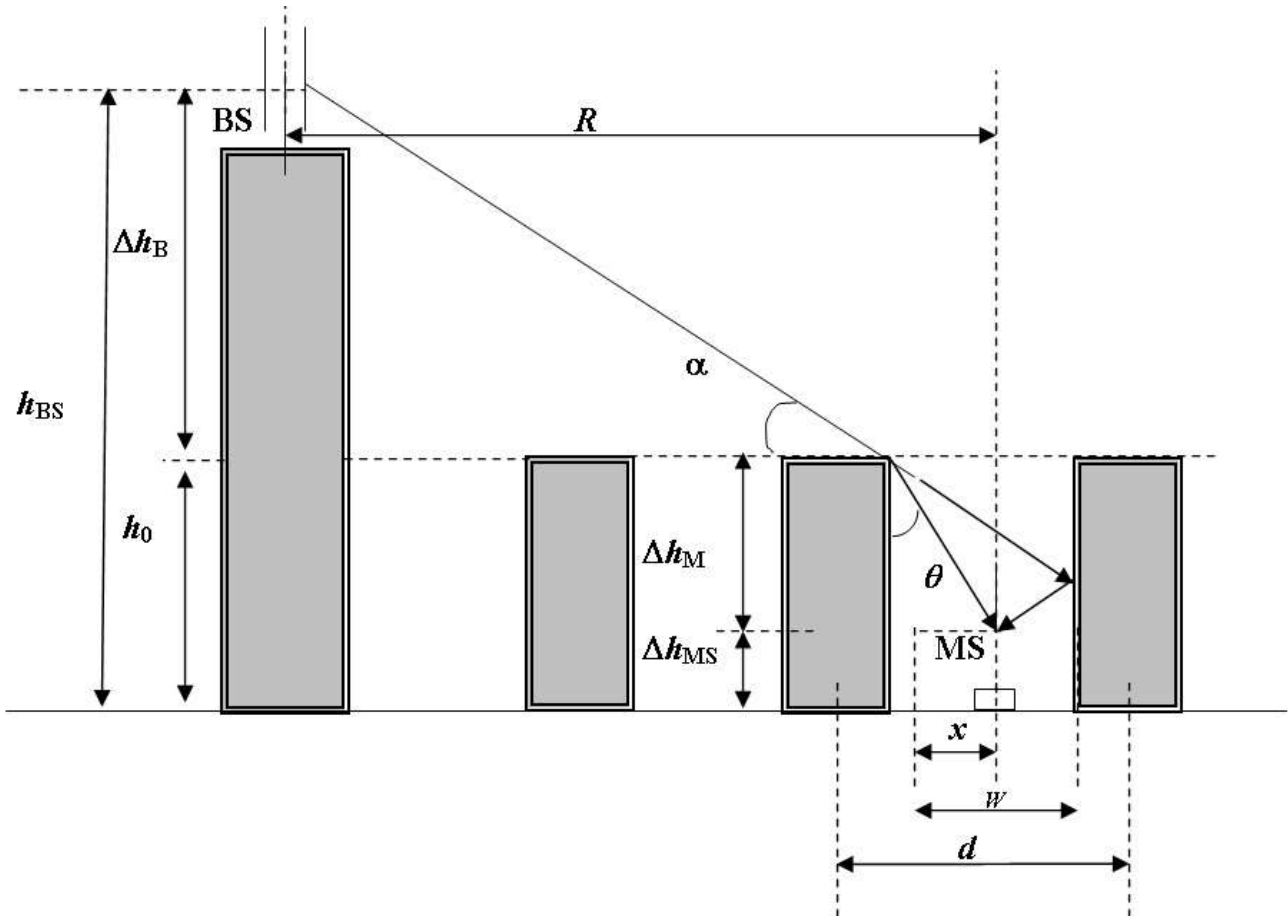


Рис. 21.1. Інтерференція променів у точці прийому

Модель Кся-Бертоні дозволяє оцінити середній рівень втрат і у тих випадках, коли антена БС розташована на рівні дахів або нижче рівня дахів (такі прийоми використовують, коли необхідно "засвітити" обмежену локальну область: площа, сквер і т.д.). У цих випадках вираження для величини загасання будуть наступні.

1. Антена *BS* на рівні дахів:

$$L = -10 \lg \left[\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi R}} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[\frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[\left(\frac{d}{R} \right)^2 \right], \text{ дБ.} \quad (23)$$

2. Антена *BS* нижче рівня дахів:

$$L = -10 \lg \left[\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi R}} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[\frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[\left(\frac{d}{2\pi(R-d)} \right)^2 \frac{\lambda}{\sqrt{\Delta h_B^2 + d^2}} \left(\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{2\pi + \varphi} \right) \right], \text{ дБ,} \quad (24)$$

де $\varphi = \tan^{-1} (\Delta h_B / d)$.

Незважаючи на те, що модель Кся-Бертоні не враховує ряд важливих параметрів (вид будівельних матеріалів, різна орієнтація вулиць і т.п.), вона дає простий і зручний спосіб одержання попередніх оцінок рівня середніх втрат у каналі зв'язку.

Модель Еглі. Іноді буває необхідно оперативно зробити розрахунок радіуса зони обслуговування системи для конкретного випадку положення БС на місцевості, робочої частоти й характеристик радіоелектронних засобів. Часто при цьому використовується так зване модифіковане рівняння *Egly*:

$$R_{90} = 10 E_g,$$

$$E_g = (P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}} - L_{\text{ф}} - L_3 - L_{\text{ш}} - 117 - U_{\text{пр}} + 20 \lg(h_1 h_2) - 201 \lg f) / 40, \quad (25)$$

де R_{90} - оцінка дальності прийому на рівні 90% надійності;

$P_{\text{пер}}$ - потужність передавача БС;

$G_{\text{пер}}$ - коефіцієнт підсилення антени БС;

$G_{\text{пр}}$ - коефіцієнт підсилення антени МС;

$L_{\text{ф}}$ - втрати у фідерних трактах приймально-передавального устаткування;

L_3 - втрати компенсації завмирань;

$L_{\text{ш}}$ - шумові втрати;

$U_{\text{пр}}(P_{\text{min}})$ - реальна чутливість приймача МС, дБ/Вт;

f - робоча частота.

Втрати на завмирання L_3 прийняті наступними, дБ:

- низькочастотна частина УКХ – діапазону	-11
- високочастотна частина УКХ – діапазону	-14
- діапазон 450 МГц	-17
- діапазон 850 МГц	-19.

21.3. Визначення середніх втрат потужності сигналу на трасі в стільникових мережах згідно моделі Окамура-Хата

Модель Окамура-Хата одержала найбільш широке поширення при розрахунках втрат на трасі й використовується для розрахунків у діапазонах 150, 450 і 900 МГц. Вона є статистичною моделлю розрахунку втрат на трасі поширення і рекомендована МСЕ. Базується на аналітичній апроксимації результатів практичних вимірів. У рамках цієї моделі втрати L для випадку квазіплоского міста розраховуються в такий спосіб:

$$L = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg h_B + k \cdot (44,9 - 6,55 \lg h_B) \lg R - a(h_M), \quad (26)$$

де h_B – ефективна висота установки антени БС, у діапазоні (30...200) м;

R – відстань від БС до МС, у діапазоні (1...10) км;

f – частота випромінювання БС, МГц;

k – поправочний коефіцієнт, що враховує довжину траси;

$a(h_M)$ – поправочний коефіцієнт, що залежить від висоти розміщення мобільної антени h_M і для великого міста при $f > 400$ МГц дорівнює:

$$a(h_M) = 3,2(\lg 11,75 h_M)^2 - 4,97. \quad (27)$$

Для втрат передачі в примісті:

$$L_s = L - 2 \left(\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5,4. \quad (28)$$

Для втрат передачі на відкритій місцевості:

$$L_0 = L - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 40,94. \quad (29)$$

Отже, необхідна чутливість приймача мобільної станції в межах з радіусом R відповідно до моделі Хати (26):

$$P_{OMS} = P_{BS} + G_{BS} - 69,55 - 26,16 \lg f + \\ + 13,82 \lg h_B - k (44,9 - 6,55 \lg h_{BS}) \lg R, \quad (30)$$

де

P_{OMS} – чутливість приймача мобільної станції;

P_{BS} – потужність передавача базової станції;

h_{BS} – висота установки антени базової станції, м;

G_{BS} – коефіцієнт підсилення передавальної антени базової станції,

дБ;

R – довжина траси, км.

При наявності даних про морфоструктуру місцевості уздовж лінії поширення радіосигналу, використовується модифікація моделі, що враховує зміну умов поширення сигналу від однієї ділянки місцевості з досить однорідною структурою до іншої:

$$L = 69,55 + 26 \lg (f) - 13,82 \lg (h_{BS}) + \\ + 31 \lg R + \sum_k \delta B_k \lg (d_{k2} / d_{k1}) + L_{dif}, \quad (31)$$

де h_{BS} – висота установки антени BS , м;

d_{k1} – дальність від BS до початку k -ої зони (ділянки), км;

d_{k2} – дальність від BS до кінця k -ої зони (ділянки), км;

δB_k – поправка до коефіцієнту загасання, яка обумовлена умовами поширення радіосигналу в k -ої зоні;

L_{dif} – дифракційні втрати, дБ.

Серед численних експериментальних досліджень, пов'язаних із прогнозом поширення радіохвиль для мобільних систем, дослідження Окамура вважається найбільш вичерпними. У рамках цих досліджень побудовані криві вимірів напруженості поля радіосигналів на частотах 150...1500 МГц.

Емпіричні формули, що апроксимують криві Окамура для медіанного значення ослаблення радіосигналу між двома ізотропними антенами (передавальною й приймальною), були отримані М. Хата і відомі як емпірична модель для ослаблення (26), в якій коефіцієнт k дозволяє розширити дію моделі для протяжної траси:

$$k = 1 \quad \text{для} \quad R < 20 \text{ км}, \\ k = 1 + (0,14 + 1,87 \cdot 10^{-4} f + 1,07 \cdot 10^{-3} h_{BS})(\lg R / 10)^{0,8} \\ \text{для} \quad 20 \text{ км} < R < 100 \text{ км}.$$

Область застосування (26) можна розширити для діапазону 1500...2000МГц (що використовується у мікростільникових структурах мереж). Відповідно до цієї моделі, що зветься *COST 231-Hata Model*, міські втрати поширення радіохвиль L_M визначаються формулою:

$$L_M = 46,3 + 33,9 \lg f - 13,82 \lg (h_{BS}) - a(h_{MS}) + \\ + (44,9 - 6,55 \lg(h_{BS})) \lg R + C_M \quad (32)$$

де $C_M = 0$ дБ для міст середніх розмірів, $C_M = 3$ дБ для великих міст.

Для втрат у примісті:

$$L_{ПГ} = L_M - 2 \cdot [\lg(f / 28)]^2 - 5,4. \quad (33)$$

Для втрат у сільській місцевості:

$$L_{СМ} = L_M - 4,78 \cdot [\lg(f)]^2 + 18,33 \lg f - 35,94. \quad (34)$$

Втрати на відкритому просторі:

$$L_{ВП} = L_M - 4,78 \cdot [\lg(f)]^2 + 18,33 \lg f - 40,94. \quad (35)$$

Відповідно до даного підходу для статистично однорідного міста відношення зон покриття BS для різних робочих частот визначається формулою:

$$R_1/R_2 = (f_2 / f_1)^\gamma,$$

де $\gamma = 2,616/\beta$. Показник ослаблення β лежить у межах $3 < \beta < 4$ (для низькоповерхової будівлі $\beta=3$, для щільної високоповерхової будівлі $\beta=4$).

22. Системи стільникового зв'язку III та IV поколінь

Порівняльні характеристики технологій мобільного зв'язку різних поколінь

Таблиця 22.1

Технології	2G	2,5G (2G+)	3G	4G	5G
Базові послуги	Мовні повідомлення	Мовні повідомлення, дані	Мовні повідомлення, дані, відеодані, мультимедіа, доступ до WWW	Мовні повідомлення, дані, мультимедіа, доступ до WWW, мобільний ІНТЕРНЕТ, мобільне телерадіомовлення	Повний спектр послуг
Швидкість передачі, кбіт/с	9,6 ... 14,4	115 (фаза I) 384 (фаза II)	2048 (фаза I) 10000 (фаза II)	10 000 ... 20 000	20 000 ... 100 000
Тип комутації	Комутація каналів	Змішана (переважно каналів)	Змішана (переважно пакетів)	Вимоги невизначені	Вимоги невизначені
Базові технології радіодоступу	<i>GSM, TDMA, cdmaOne</i>	<i>GPRS, EDGE</i>	<i>WCDMA, IMT-2000, UMTS</i>	<i>WCDMA+, W-OFDM, UWB</i>	Досліджуються
Терміни експлуатації	1995 - 2010	2000 - 2015	2002 - 2020	2012 - 2025	2015 - 2050

На відміну від технологій попередніх поколінь, де передача мови була домінуючим видом послуг, в системах третього покоління передбачається забезпечити весь спектр сучасних послуг, включаючи передачу мовних повідомлень, роботу в режимі комутації каналів і пакетів, взаємодію з застосуваннями *Internet*, симетричну і асиметричну передачу з високою якістю – і в той же час гарантувати сумісність з існуючими системами.

Що стосується набору послуг, то він фактично наближується до того, що надається в мережах фіксованого зв'язку. В системах третього покоління послуги прийнято поділяти на дві групи: не мультимедійні (вузькосмугове мовлення, низькошвидкісна передача даних, трафік мереж з комутацією каналів) і мультимедійні (асиметричні та інтерактивні). Очевидно, що досягнення таких високих швидкостей при обмеженому частотному ресурсі і роботі в каналах з завмираннями буде вимагати розробки принципово нових підходів до побудови радіоінтерфейсу.

Стратегії переходу до послуг III покоління

Починаючи з 1992 року роботи по створенню систем мобільного зв'язку третього покоління в рамках Міжнародного Союзу Електрозв'язку

(ITU - International Telecommunications Union) отримали назву **IMT-2000** (з англ. *International Mobile Telecommunications* – міжнародна система мобільного зв'язку).

В рамках програми *IMT-2000* розглядаються дві стратегії переходу до послуг третього покоління: **поступова** (еволюційна) і **миттєва** (революційна). На заході ці підходи отримали позначення *N* (англ. *Narrowband*) і *W* (англ. *Wideband*) стратегій (табл. 22.2).

Революційна стратегія передбачає впровадження всіх нових технологій та інтерфейсів, що супроводжується великими капітальними витратами і значним комерційним ризиком. Для відпрацювання даної стратегії в різних частинах світу вже розгортаються експериментальні мережі. Японія та азіатські регіони стали першими масовими полігонами, де нові технології планувалося випробувати до 2002 року. Однією із найважливіших ознак, які відрізняють два підходи, є спосіб освоєння частотного діапазону. При революційному сценарії вимагається новий частотний ресурс. Японія і Європа мають намір піти цим шляхом і виділити для систем третього покоління індивідуальні смуги частот. В США спектр, виділений *IMT-2000*, вже зайнятий службою *PCS*, тому системи третього покоління будуть працювати на старих частотах разом з мережами стандартів *TDMA/AMPS*.

Прибічники двох наймасовіших технологій другого покоління *TDMA/AMPS* і *GSM* встали на еволюційний шлях розвитку. Сьогодні ці системи мають обмежені можливості по нарощуванню пропускної здатності і видам послуг в рамках виділеного частотного діапазону. Зростання їх ємності без додаткового розширення спектру можливе лише за рахунок переходу на напівшвидкісні канали, введення багатосекторних антен або використання спектрально-ефективних методів модуляції (наприклад, *8PSK* і ін.)

Еволюційний підхід вимагає менших капітальних затрат і передбачає плавну заміну обладнання залежно від рівня попиту на конкретні види послуг. Такий підхід дозволяє максимально використовувати існуючу інфраструктуру мережі зв'язку, вводячи нові мережеві елементи в процесі послідовної модернізації. Основний недолік еволюційного підходу – відсутність можливості використання всіх переваг нових технологій і організації глобального роумінгу.

Очевидно, що ринкові фактори і особливості регіональних ринків Європи, Північної Америки і Азії будуть перешкоджати швидкому переходу від існуючих технологій до стандартів третього покоління. Етап розгортання нових технологій за оцінками спеціалістів складає не менше 2-3 років, а сумісне існування буде тривати не менше 10 років.

Дві стратегії освоєння ринку мобільного зв'язку

Таблиця 22.2

Ознака	Еволюційний підхід	Революційний підхід
Метод використання частотного ресурсу	Робота в старих діапазонах	Освоєння нових діапазонів
Принцип надання послуг	Поступове розширення асортименту послуг	Нові послуги з початку розгортання
Пропускна здатність	Поступове нарощування	Висока з самого початку
Стратегія створення мережевої інфраструктури	Повільний і поступовий перехід від 2G до 3G по мірі появи попиту на послуги	Створення дослідних районів ("островів") з повним набором послуг
Технологічний рівень	Нові технології, що реалізуються в окремих елементах	Всі технології – найновіші
Архітектура мережі	Максимальне використання існуючої інфраструктури	Нова
Комерційний ризик	Низький	Високий
Склад операторів	В основному той же, що і в 2G	Оператори, які купили ліцензію на послуги 3G
Глобальний роумінг	З обмеженням	Без обмежень
Капітальні затрати	Незначні	Значні

22.1. Основні положення програми *IMT-2000*

Для систем третього покоління на Міжнародній конференції по радіочастотам *WARC-92* був визначений діапазон частот поблизу 2 ГГц. Введення служб по стандарту *IMT-2000* має потребу у звільненні смуг частот в існуючій інфраструктурі деяких країн світу. *ITU* прогнозує, що в кожному регіоні до 2015 р. буде потрібно додатково мати не менше 160 МГц спектру частот.

Відповідно до програми *IMT-2000* технології III покоління повинні забезпечити:

- передачу голосу, даних і мультимедійних послуг (табл.22.3);
- високу швидкість передачі даних як в середині приміщень, так і на відкритій місцевості;
- симетричну і асиметричну передачу даних;
- підтримку каналної і пакетної комутації для забезпечення таких сервісів, як *Internet Protocol (IP)* та *Real Time Video*;
- високу якість передачі голосу, яка не поступається якості голосу при передачі по проводимим лініям;
- компактність спектру сигналу і більш ефективно його використання;

- можливість глобального роумінгу;
- взаємну роботу із супутниковими системами;
- високу екологічну безпеку (мали рівні потужності випромінюваного сигналу, особливо для абонентського обладнання).

Типи служб, доступних в *IMT-2000*

Табл.22.3

Класифікація служби	Швидкість "користувач-мережа", кбіт/с	Швидкість "мережа-користувач", кбіт/с	Приклад сервісу	Комутація
Діалогове мультимедіа	2048	2048	телеконференція	каналів
Високошвидкісне мультимедіа	384	2048	телебачення	пакетів
Середнє мультимедіа	128...384	128...384	Web - навігація	пакетів
Дані по комутованим каналам	64 (144)	64 (144)	Інтернет, факсимільні повідомлення	каналів
Передача повідомлень	9,6...14,4	9,6...14,4	електронна пошта	пакетів
Голос	4...32	4...32	телефонний зв'язок	каналів

Програма *IMT-2000* базується на ряді ознак, що визначають принципи побудови систем 3-го покоління і їх архітектуру. Вже на першому етапі розгортання вони повинні забезпечувати певні значення швидкості передачі для *різних ступенів мобільності* абонента (тобто різних швидкостей його руху) залежно від *величини зони покриття*:

- до 2,048 Мбіт/с при низькій мобільності (швидкість менше 3 км/год) у локальній зоні покриття;
- до 144 кбіт/с при високій мобільності (до 120 км/год) у великій зоні покриття;
- до 64 (144) кбіт/с при глобальному покритті.

В структурі *IMT-2000* було визначено декілька радіоінтерфейсів (рис.22.1):

- *IMT-DS*(*Direct Spread*)-*UTRA FDD* (*WCDMA*),
- *IMT-TC*(*Time Code*) - *UTRA TDD* (*TD-SCDMA*),
- *IMT-MC*(*Multi Carrier*) - *CDMA2000*,
- *IMT-SC*(*Single Carrier*) - *UWC-136*,
- *IMT-FT*(*Frequency Time*) – *DECT*.

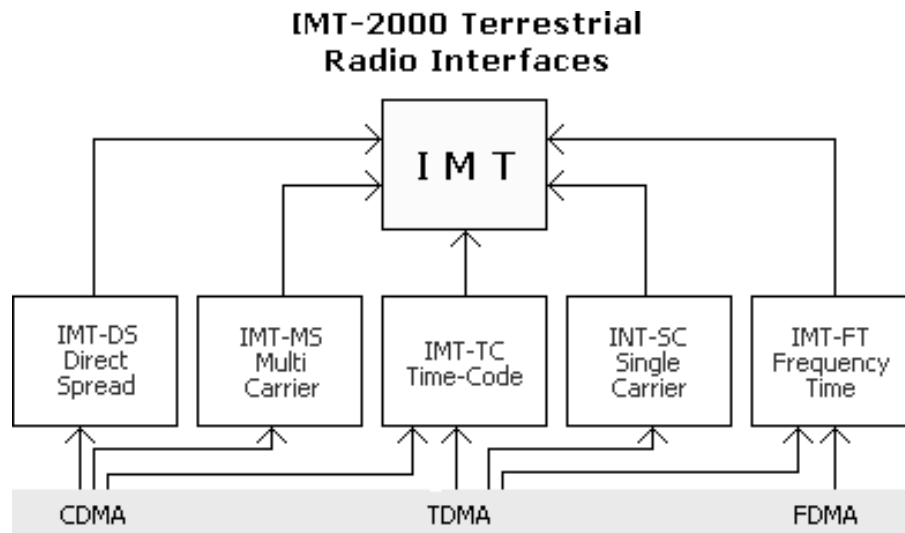


Рис. 22.1. Радіоінтерфейси *IMT-2000*

Найбільше розповсюдження в світі отримали два стандарти: **UMTS** (або **WCDMA**) і **CDMA2000** (*IMT-MC*), в основі яких лежить одна і та ж технологія - **CDMA**.

В проєкті **3GPP** технологія **WCDMA** (*Wideband Code Division Multiple Access* – широкопasmовий **CDMA**) називається **UTRA** (*UMTS Terrestrial Radio Access* - Універсальний наземний радіодоступ) з режимами **FDD** (частотного дуплексного розділення каналів) і **TDD** (часового дуплексного розділення каналів), при цьому назва **UMTS** використовується для об'єднання обох цих режимів - **FDD** і **TDD**.

Технологія **UMTS** (з англ. *Universal Mobile Telecommunications System* - універсальна система мобільного електрозв'язку) розроблена для модернізації мереж **GSM**, і отримала широке розповсюдження не тільки в Європі, але і в багатьох інших регіонах світу.

Технологія **CDMA2000** забезпечує еволюційний перехід від вузькосмгових систем з кодовим розділенням каналів «другого покоління» стандарту **IS-95** до систем **CDMA** «третього покоління» і отримала найбільше розповсюдження на північноамериканському континенті, а також в країнах Азіатсько-Тихоокеанського регіону. Термін **MC** (з англ. *Multi Carrier*) в позначенні радіоінтерфейсу планується застосовувати для режимів, які використовують декілька широкопasmових несучих частот у «прямому каналі» (наприклад, при об'єднанні до трьох частотних каналів – режим **3x**).

Роботи по стандартизації **UMTS** координується міжнародною групою **3GPP** (з англ. *Third Generation Partnership Project*), а по стандартизації **CDMA2000** - міжнародною групою **3GPP2**, які створені і співіснують в рамках міжнародної організації **ITU**.

Після Асамблеї радіозв'язку (AP-07) МСЕ було розширено сімейство радіоінтерфейсів на основі технології **OFDMA** і прийнята **IMT-Advanced** в якості нової назви після **IMT-2000**.

Створення єдиного інформаційного простору за допомогою систем мобільного зв'язку третього покоління неможливе без виділення загального частотного ресурсу, необхідного для їх функціонування. Тому однією з основних проблем, які повинен був вирішити МСЕ, розробляючи стратегію упровадження мереж зв'язку 3G, стала задача виділення єдиного діапазону частот.

Підхід до освоєння частотного ресурсу в різних регіонах світу визначається вибором «революційного» або «еволюційного» варіанту розвитку мобільних систем третього покоління. В Європі передбачається поєднання цих варіантів. Тому для нових систем підхід до розподілу спектру практично співпав з рекомендаціями МСЕ. Відповідно до рішення Європейського комітету радіозв'язку (*ERC - European Radiocommunications Committee*) для початку комерційної експлуатації систем третього покоління з 2002 р. зарезервовані наступні смуги частот (рис.22.2.):

- парні смуги частот 1920...1980 і 2110...2170 МГц (2 x 60 МГц) - для наземних мереж, що працюють в режимі *FDD* на основі радіоінтерфейсу *IMT-DS*;

- непарні смуги частот 1900...1920 і 2010...2025 МГц - для наземних мереж із дуплексним рознесенням *TDD* і застосуванням радіоінтерфейсу *IMT-TC*;

- 1980...2010 і 2170...2200 МГц - для організації супутникових мереж (*MSS - Mobile Satellite Services*).

Перспективи підвищення ефективності використання ресурсів радіочастотного спектру пов'язані як з технічними, так і з організаційними аспектами. З технічної точки зору це може бути досягнуто застосуванням нових спектрально-ефективних методів модуляції і завадостійкого кодування, протоколів радіодоступу, методів рознесеного прийому. Окрім цього, пропускна спроможність мереж мобільного зв'язку може бути підвищена шляхом застосування більш ефективних методів стиснення мультимедійної інформації і гнучкого управління радіоресурсами. Організаційні заходи припускають сумісне використання смуг частот операторами наземних і супутникових мереж зв'язку та конверсію спектру.

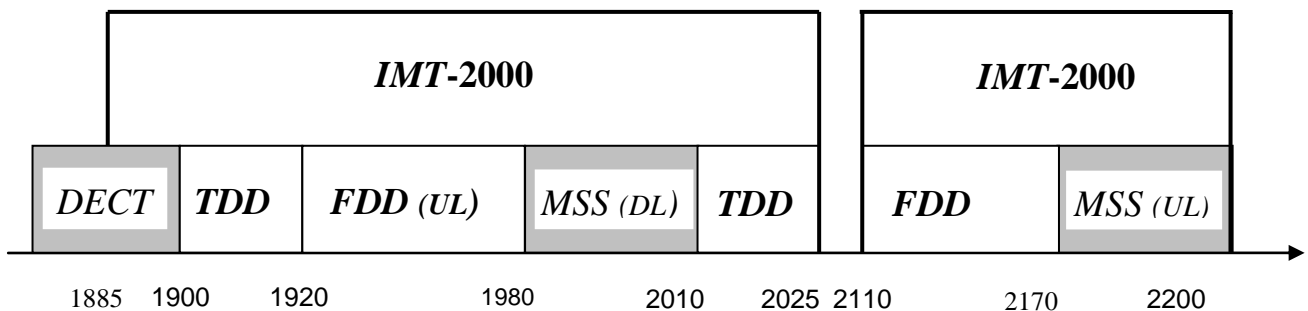


Рис. 22.2. Розподіл частотного ресурсу в Європі для *IMT-2000*
(DL- downlink, UL- uplink; MSS - Mobile Satellite Services)

22.2. Радіоінтерфейс WCDMA

WCDMA (з англ. *Wideband Code Division Multiple Access*) — широкосмуговий множинний доступ із кодовим розподілом каналів, який використовує дві(прямий та зворотній канали) смуги радіочастот по 5 МГц. Термін *WCDMA* також використовується для опису самостійного стандарту стільникової мережі, що проектувався як надбудова над мережею *GSM*. Він був розроблений японською фірмою *ARIB* в 1998 році. Одна з основних характеристик розробки – можливість «хендоверу» до мереж *GSM*, які не можуть бути модернізовані для роботи з *WCDMA*, хоча деякі частини системи *GSM*, такі, як послуги пакетної радіопередачі (*GPRS*), можуть багаторазово транслюватися через мережу *WCDMA*. Перші мережі *WCDMA* були розгорнуті в Японії операторами *NTT DoCoMo* і *Jphone*.



Основні характеристики радіоінтерфейсу WCDMA-FDD :

- метод прямого розширення спектра - *DS CDMA*;
- діапазон частот в Європі і більшості країн Азії (крім США):
 - для *WCDMA-FDD* виділяється 2 канали по 60 МГц, тобто «прямий канал» (*downlink*) - 2110...2170 МГц, «зворотний канал» (*uplink*) - 1920...1980 МГц;
 - для *TDD* - смуги частот до 25 МГц у діапазонах 1900...1920, 2010...2025 МГц;
- дуплексна схема – *FDD* із рознесенням 190 МГц;
- ширина смуги частот сигналу – 5 (можливо 10 або 20) МГц;
- чіпова швидкість – 3,84 Мчп/с;
- модуляція:
 - в «прямому каналі» - *QPSK*,
 - в «зворотному каналі» - *BPSK*;
- для розширення спектру використовуються коди Голда;
- кодування – згорткове, турбо-кодування, каскадне;
- перемежування – міжкадрове та внутрішньокадрове(10/20/40/80мс);
- довжина кадру – 10 мс (суперкадру – 720 мс);
- структура кадру – 15 часових слотів тривалістю 10:15 = 0,666..мс;
- управління потужністю - замкнута та відкрита схеми;
- синхронізація БС – асинхронна (не потребує точної синхронізації від *GPS*);
- тип «хендоверу» – м'який, напівм'який, міжчастотний і міжсистемний;
- мультишвидкісна передача - забезпечується використанням змінного коефіцієнта розширення і мультикоду.

Однаковий частотний канал може повторно використовуватися базовими станціями навіть сусідніх стільників, що значно підвищує спектральну ефективність у порівнянні із системами *TDMA*.

Кількість абонентів в одному частотному каналі шириною 5 МГц та швидкість передачі, яка їм надається залежить від коефіцієнта

розширення спектру, що використовується на даний час. Динамічний статус абонентів поділяється на рівні, причому максимальна кількість абонентів (або коефіцієнт розширення спектру) на кожному рівні визначається наступним чином:

$$N_m = 2^{m-1},$$

де m - номер рівня ($m=1, 2, 3, \dots, 10$).

В «прямому каналі» використовують рівні від 3-го до 10-го (тобто, кількість абонентів – від 4 до 512), в «зворотному каналі» - рівні від четвертого до десятого (кількість абонентів – від 4 до 256). Якщо існуючу швидкість в каналі розділяти порівну між всіма абонентами, то для кожного рівня m вона становить (табл.22.4):

$$V_m \text{ [кбіт/с]} = 3840 : N_m$$

Табл. 22.4

Номер рівня	Кількість абонентів в одному частотному каналі (коефіцієнт розширення спектру)	Швидкість передачі символів, кбіт/с
1	1	3840
2	2	1920
3	4	960
4	8	480
5	16	240
6	32	120
7	64	60
8	128	30
9	256	15
10	512	7,5

В одному «прямому каналі» одночасно можуть обслуговуватися абоненти різних рівнів (наприклад, 1 абонент п'ятого рівня зі швидкістю 240 кбіт/с та 60 абонентів сьомого рівня зі швидкістю 60 кбіт/с), але їх сумарна швидкість не може перевищувати значення 3,84 Мбіт/с. Швидкість передачі корисної інформації в каналі передачі даних (*DPDCH*) залежить від швидкості кодування кодеру, який зменшує її приблизно в 2 рази. Застосування в «зворотному каналі» модуляції *QPSK* приводить до збільшення швидкості у 2 рази в порівнянні із модуляцією *BPSK*, яка використовується у «прямому каналі».

Перша модифікація цього стандарту *UMTS* мала багато технологічних недоліків: низьку ємність мережі, малий радіус дії стільника, порівняно невелику швидкість передачі даних.

Подальшим розвитком мереж *UMTS* стало використання надбудови ***HSPA*** (високошвидкісного пакетного доступу), яка включає протокол доступу ***SDPA*** (з англ. *High-Speed Downlink Packet Access* - швидкісна пакетна передача даних в прямому каналі) та ***HSUPA*** (з англ. *High Speed Uplink Packet Access* - швидкісна пакетна передача даних в зворотному каналі). Для підвищення швидкості передачі була використана більш ефективна модуляція – *16QAM* та різні схеми кодування (різну кількість *HS-DSCH* кодів), а максимальна швидкість в прямому каналі досягає

14,2 Мбіт/с (для Release 5 та категорії абонентського обладнання **10**), в зворотному - 5,8 Мбіт/с.

Табл.22.5

Категорія	Макс. к-сть HS-DSCH кодів	Модуляція	Макс. швидкість [Mbit/s]
1	5	QPSK та 16-QAM	1.2
2	5	QPSK та 16-QAM	1.2
3	5	QPSK та 16-QAM	1.8
4	5	QPSK та 16-QAM	1.8
5	5	QPSK та 16-QAM	3.6
6	5	QPSK та 16-QAM	3.6
7	10	QPSK та 16-QAM	7.3
8	10	QPSK та 16-QAM	7.3
9	15	QPSK та 16-QAM	10.2
10	15	QPSK та 16-QAM	14.4
11	5	лише QPSK	0.9
12	5	лише QPSK	1.8

Надбудова **HSPA+** (Release 7) додатково передбачає використання технології **MIMO** для забезпечення максимальної швидкості в прямому каналі – 42,2 Мбіт/с.

Надбудова **DC-HSPA w/MIMO** (Release 8 та 9) крім того надає можливість виділяти для зв'язку базової станції з мобільною 2 частотних канали, а максимальна швидкість при цьому - 84,4 Мбіт/с.

Деякі основні відмінності радіоінтерфейсів стандартів **WCDMA**, **GSM**, **IS-95** наведені в таблиці 22.6.

Табл.22.6

Стандарт Характеристика	WCDMA	GSM	IS-95 (CDMAone)
Рознесення несучих частот, МГц	5	0,2	1,25
Швидкість передачі елементу сигналу, Мчп/с	3,84	-	1,2288
Частота управління потужністю, Гц	1500 в обох напрямках	≤ 2	800 - у зворотному каналі, в прямому-повільне
Синхронізація базових станцій	не потребується	не потребується	через GPS
Боротьба з явищем багатопроменевого розповсюдження	за рахунок широкого каналу	скачкоподібна перебудова частот	за рахунок широкого каналу
Асиметрія швидкості передачі в прямому і зворотному каналах	передбачена (HSPA)	не передбачена	не передбачена

22.3. Архітектура UMTS

Система UMTS складається з ряду логічних елементів мережі, кожний з яких виконує певні функції. Елементи мережі можуть групуватися на основі близькості виконуваних функцій або на основі підмережі, до якої вони належать.

По своїх функціях елементи мережі групуються в наступні підсистеми (рис. 22.3):

- устаткування користувача (**UE**);
- мережа радіодоступу територіального рівня (**UTRAN**), яка виконує всі функції, що відносяться до радіозв'язку;
- базова мережа (**CN - Core Network**), яка забезпечує комутацію і маршрутизацію викликів і канали передачі даних в зовнішні мережі.

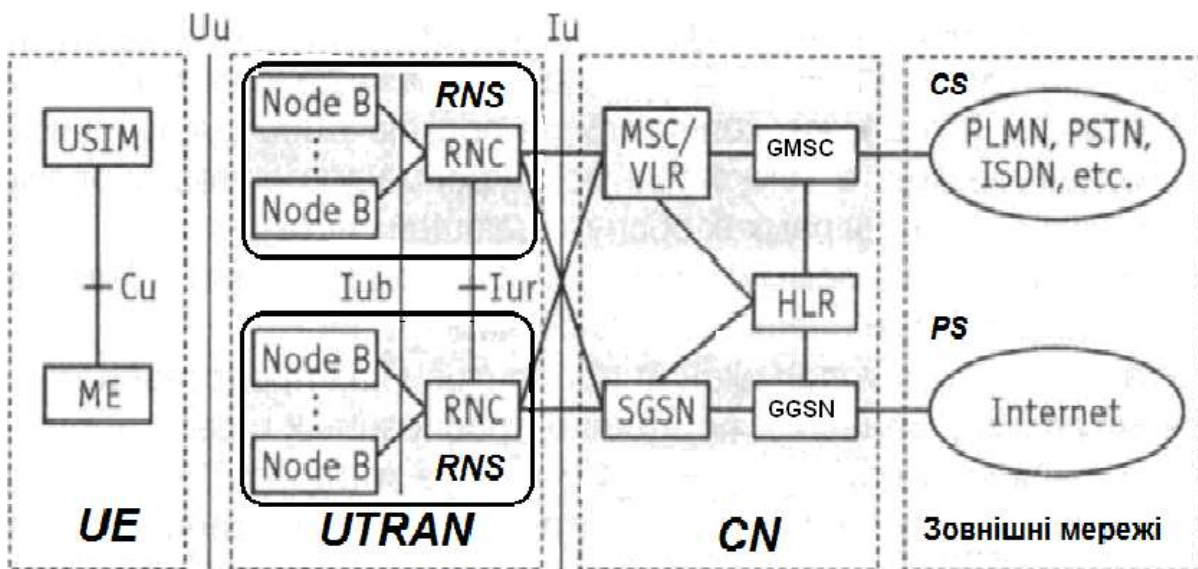


Рис. 22.3. Архітектура UMTS

UE складається з двох частин:

- обладнання рухомого зв'язку (**ME**) – це радіотермінал, що використовується для радіозв'язку через інтерфейс *Uu*.

- модуля ідентифікації абонента (**USIM**), що є інтелектуальним модулем, який служить ідентифікатором абонента, виконує алгоритм автентифікації і шифрування, містить деякі дані про послуги, якими має право користуватися абонент, які необхідні при використанні терміналу.

Обладнання *ME* може бути сумісним з одним або декількома існуючими радіоінтерфейсами доступу в мережу, наприклад абонентське обладнання, що працює у двох стандартах *UMTS/GSM*.

Функції ідентифікатора абонента реалізовані в окремій **смарт - карті**, що містить дані про певного користувача і дозволяє ідентифікувати його незалежно від того, яке мобільне обладнання він використовує. В

інтересах систем *UMTS* прийнято два стандарти (технічні специфікації) на ідентифікаційні модулі користувача:

- *USIM* (з англ. *Universal Subscriber Identity Module* - універсальний модуль ідентифікації користувача відповідно до *3GPP*);
- *UICC* (з англ. *Universal Integrated Circuit Card*) - мультисервісна платформа, що дозволяє на одній і тій же карті запускати різні сервіси для смарт - карт.

Причому, якщо *USIM* - це програмний інтерфейс, то *UICC* - фізичний і логічний інтерфейс .

У загальному випадку в *USIM* містяться:

- дані користувача;
- алгоритми і ключі ідентифікації;
- передплатні дані користувача на послуги;
- дані для доступу до мережі *GSM*.

До складу *UTRAN* входять:

- вузол *B (Node B)*, який перетворює потік даних між інтерфейсами *Iub* та *Uu*. Він також бере участь в управлінні радіоресурсами (слід відмітити, що термін "Вузол *B*" відповідає специфікаціям *3GPP* і фактично позначає більш загальний термін "Базова станція");

- контролер радіомережі (*RNC*), який управляє радіоресурсами на відповідній території (до нього підключені декілька вузлів *B*) та є точкою доступу до сервісу для всіх послуг, які *UTRAN* надає *CN*, наприклад, управління з'єднаннями з *UE*.

Базові станції (*Node B*) здійснюють організацію радіоканалів по викликах мобільних абонентів або зі своєї ініціативи при надходженні зовнішнього виклику. Основною функцією *Node B* є реалізація радіоінтерфейсу (обробка радіосигналу, модуляція/демодуляція з розширенням/стиском спектра сигналу, кодування/декодування тощо), у тому числі, виконання деяких операцій по розподілу радіоресурсу мережі (управління потужністю випромінювання, здійснення «хендоверу»).

Контролер мережі радіодоступу (*RNC*) здійснює управління базовими станціями, з якими він утворює підсистему *RNS*, і взаємодіє із центром комутації мережі *3G-MSC/VLR*. Основними функціями *RNC* є: управління розподілом радіоканалів, контроль з'єднань, регулювання їхньої черговості, віддалена динамічна комутація, а також контроль за розподілом абонентського навантаження. Контролери ведучих світових виробників телекомунікаційного обладнання будуються, як правило, на базі *ATM* - комутатора, які розширюються блоками управління радіоканалами.

До базової мережі (*CN*) входять:

- центр комутації мобільної служби з базою даних гостей користувачів (*MSC/VLR*), які надають послуги по комутації каналів (*CS*). Функція *VLR* зберігає екземпляр профілю обслуговування гостя

користувача, а також більш точну інформацію про місцеположення *UE* в системі обслуговування;

- *регістр домашнього місцезнаходження*, по місцю реєстрації (***HLR***)
- це база даних, що розміщується в домашню систему абонента, яка зберігає в пам'яті основний екземпляр профілю обслуговування абонента. Профіль обслуговування містить, наприклад, інформацію про послуги, що надаються абоненту, заборонені райони роумінгу і додаткову сервісну інформацію, наприклад, про можливість переадресації телефонного виклику тощо. Профіль обслуговування створюється, коли новий абонент прописується в системі, і залишається в пам'яті до тих пір, поки зберігається ця прописка. Для маршрутизації вхідних повідомлень до *UE* (тобто викликів або коротких повідомлень) *HLR* також записує дані про місцеположення *UE* на рівні системи обслуговування.

- *шлюзовий вузол MSC (GMSC)* - це комутатор в місці, де *UMTS PLMN* з'єднуються із зовнішніми мережами із комутацією каналів (*CS*). Всі вхідні і вихідні з'єднання *CS* проходять через *GMSC*.

- *вузол по забезпеченню послуг GPRS (SGSN)*, який подібний по функціям до *MSC/VLR*, але використовується для послуг із комутацією пакетів (*PS*). Він здійснює конвертацію протоколів *IP*-мережі в протоколи, які використовують *Node B* і *UE*, збір даних про оплату і трафік абонентів і маршрутизації даних (при підключенні до інших зовнішніх мереж).

- *шлюзовий вузол по забезпеченню міжмережевого переходу GPRS (GGSN)*, який функціонально близький до *GMSC*, але пов'язаний з наданням послуг із комутацією пакетів. Він здійснює перерозподіл пакетів даних мобільним абонентам і контролює правильність приєднання зовнішніх мереж, виконуючи роль маршрутизатора підсистеми.

Зовнішні мережі можна розділити на дві групи:

- *мережі CS*, які забезпечують з'єднання з комутацією каналів, як це має місце в існуючому в даний час телефонному зв'язку;

- *мережі PS*, які забезпечують з'єднання з комутацією пакетів даних (одним із прикладів є Інтернет).

Стандарт *UMTS* побудований таким чином, що функції усередині елементів мережі детально не визначаються. Натомість визначені інтерфейси між логічними елементами мережі. Передбачені наступні основні відкриті інтерфейси (рис.22.4):

- *інтерфейс Cu* - це електричний інтерфейс між інтелектуальною платою (старт - картою) модуля ідентифікації абонента мережі *UMTS (USIM)* та обладнанням рухомого зв'язку (*ME*);

- *інтерфейс Uu* - це радіоінтерфейс *WCDMA*, через який устаткування користувача (*UE*) отримує доступ до стаціонарної частини мережі *UMTS*;

- **інтерфейс Iub** забезпечує сполучення базової станції (*Node B*) із контролером радіомережі (*RNC*);
- **інтерфейс Iu** поєднує мережу радіодоступу територіального рівня (*UTRAN*) із базовою мережею (*CN*), подібно відповідним інтерфейсам в *GSM A* і *Gb*, **IuCS** призначений для трактів із комутацією каналів, **IuPS** - із комутацією пакетів;
- **інтерфейс Iur** - відкритий інтерфейс, який дозволяє здійснювати м'який «хендовер» - плавний естафетний перехід між контролерами радіомережі (*RNC*) від різних виробників, і тому він доповнює відкритий інтерфейс *Iu*.

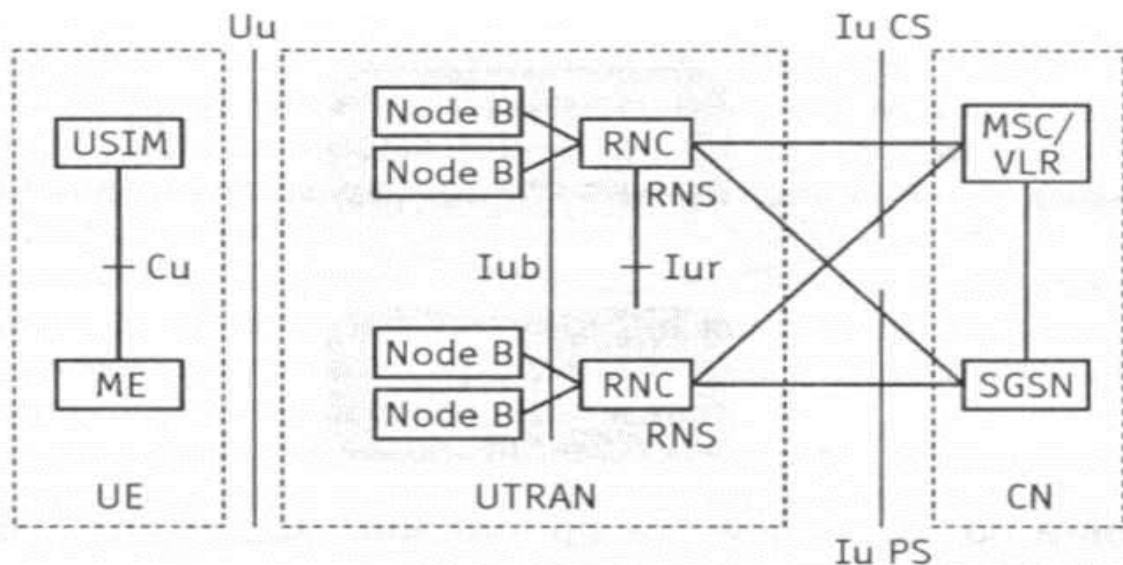


Рис. 22.4. Інтерфейси UMTS

22.4. Підсистема UTRAN

Мережа радіодоступу територіального рівня *UTRAN* являє собою підсистему мережевого доступу з відповідними мережевими інтерфейсами і протоколами та містить у собі сукупність технічних і програмних засобів.

Розглянемо деякі важливі функції *UTRAN* по забезпеченню якості послуг в мережі.

Управління доступом до мережі. Процедура управління доступом містить дві складові:

- контроль допуску до мережі;
- контроль перевантаження мережі.

Система контролю допуску (Admission Control) до мережі забезпечує допуск нових абонентів у мережу і можливість створення нових з'єднань, виходячи із завантаження мережі. Завдання системи контролю допуску - уникнути перевантаження мережі. Система приймає рішення на основі даних вимірювань рівня завад у мережі, випромінюваній потужності і наявності вільного ресурсу в мережі

UNRAN. Крім того, система використовується при первинному входженні абонентів у мережу, вимірі й відновленні рівня помилок у каналі *RAB* і забезпеченні «хендоверу». Обслуговуючий контролер *RNC* здійснює контроль допуску з використанням інтерфейсу *Iu*.

Система контролю перевантаження (Congestion Control) відслідковує (визначає) ситуації перевантаження мережі і управляє ними. У випадках, коли мережа *UTRAN* наближається до стану перевантаження або перебуває в цьому стані, а користувачі залишаються підключеними, система перерозподіляє в мережі наявні радіоресурси, обмежуючи якість обслуговування і відновлюючи втрачені зв'язки.

Управління потужністю випромінювань. Управління потужністю випромінювань за замкнутою схемою в зворотному каналі (*uplink*) регулює потужність, яка випромінюється мобільною станцією для підтримки значення відношення сигнал/завада (***SIR***) на необхідному рівні. Базова станція оцінює потужність прийнятих сигналів у співвідношенні до сукупних завад і формує команди управління (*TPC*), які передаються рухомій станції.

Однією із характерних рис технології *WCDMA* є гнучка і різноманітна конфігурація каналів радіообміну та протоколів встановлення зв'язку, яка передбачає три типи каналів:

- логічні канали (*logical channel*);
- транспортні канали (*transport channel*);
- фізичні канали (*physical channel*).

Логічні канали визначають зміст, структуру і вид переданої інформації, *транспортні канали (TCH)* відображають напрямки та точки, в які пересилаються дані логічних каналів. *Фізичні канали (PCH)* представляють платформу радіоінтерфейсу, на якій здійснюється реальна передача сигналів між абонентським устаткуванням і базовими станціями мережі радіодоступу *UTRAN*.

Фізичні канали поділяються на:

- загальні, які доступні всім абонентам відповідного стільника;
- виділені, які призначені конкретному абоненту.

До виділених фізичних каналів відносять:

- канал передачі даних (*DPDCH*);
- канал управління (*DPCCH*).

Взаємодія елементів *UTRAN* по різних типах каналів зображена на рис. 22.5.

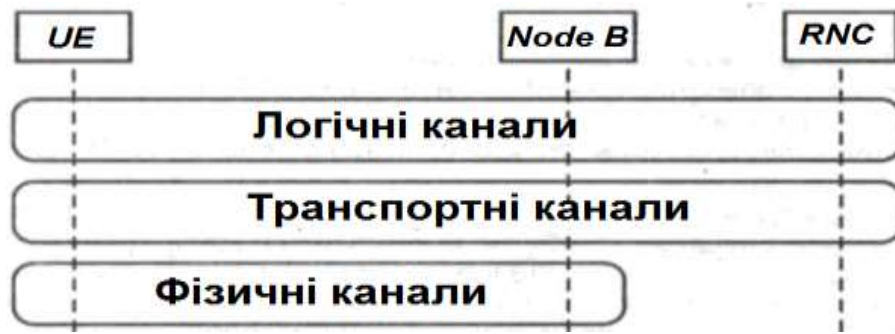


Рис. 22.5. Взаємодія елементів *UTRAN* по різних типах каналів

При цьому логічні канали як такими каналами не є, і їх можна розглядати у вигляді сукупності різних задач, які мережа та абонентське устаткування повинні вирішувати в певні моменти часу. Як частково тимчасові структури, вони перетворюються в транспортні канали, що виконують фактичну передачу інформації між абонентським устаткуванням і підсистемою *UTRAN*. Транспортні канали переносять різну інформацію з інтерфейсу *Uu* за допомогою фізичних каналів (радіосигналів). Кожен фізичний канал має свій широкосмуговий код, що дозволяє розрізнити його серед інших каналів. Абонентське устаткування користувача дозволяє працювати із виділеними і загальними фізичними каналами або з обома відразу. Контролери *RNC*, на відміну від базових станцій, що працюють із фізичними каналами, розрізняють тільки транспортні канали. Взаємозв'язок між логічними, транспортними і фізичними каналами зображено на рис. 22.6.

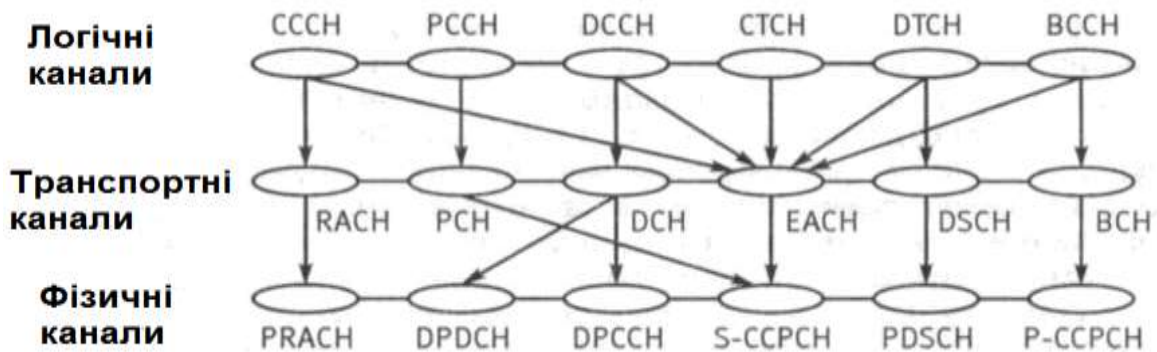


Рис. 22.6. Взаємозв'язок між логічними, транспортними і фізичними каналами

Слід зазначити, що структура каналів *UMTS* і характер їх використання істотно відрізняються від каналів у стандарті *GSM*, у якому, зокрема, фізичні канали мають заздалегідь певну структуру й орієнтуються контролером базової станції (*BSC*). У мережі *UMTS* фізичним елементом, що перетворює інформаційні потоки з рівня транспортних каналів на рівень фізичних каналів і в зворотному напрямку, є базова станція (*Node B*).

22.5. Особливості стандарту CDMA2000

Еволюційний розвиток мереж *cdmaOne* (IS-95) привів до розробки стандарту стільникового зв'язку третього покоління (радіоінтерфейс *IMT-TC*) **cdma2000-1X (IS-2000)**. CDMA2000 використовує для роботи ті ж частотні діапазони, що і *cdmaOne*, які поділені на аналогічні смуги частот по 1,25 МГц. Це значно полегшує перехід операторів до нового стандарту, так як відпадає необхідність у придбанні нової частотної ліцензії. Завдяки цьому оператори поступово замінювали обладнання більш новим і тим самим знизили до мінімуму проблеми, що виникають під час оновлення стандарту, такі як низька поширеність абонентського обладнання, великі початкові витрати, організацію транспортних каналів тощо.

Стандарт CDMA2000 передбачає суттєві вдосконалення відносно стандарту *cdmaOne*:

1. Вдосконалений *алгоритм управління потужністю* (в алгоритмі управління потужністю МС збільшили в 16 разів частоту відправки команд на зміну потужності передачі абонентського обладнання, що дозволило в 1,5 рази збільшити ємність мережі).

2. *Рознесена передача (Transmit diversity)* - МС може паралельно обслуговуватися декількома БС і вибирати сигнали БС, яка має найбільший рівень, що дозволяє значно знизити рівень помилок в каналі зв'язку і збільшити якість сигналу.

3. *Розумні антени (Smart Antennas)* – використання антенної решітки з адаптивним формуванням діаграми спрямованості дозволяють формувати окремі пучки сигналу для кожного абонента з точністю в кілька десятків метрів, завдяки чому реалізований так званий просторовий метод множинного доступу абонентів (*SDMA – Space Division Multiple Access*), що значно знижує загальний рівень інтерференції в радіоканалі та істотно розширити ємність мережі.

4. Стандарт CDMA2000 передбачає використання більш *ефективних видів модуляцій - QPSK, 8PSK, 64-QAM*.

5. *Покращена технологія цифрового кодування*.

6. Використовуються більш *ефективні вокодери*.

7. В зворотному каналі реалізований когерентний прийом. Для цього використовується зворотний пілот-канал, який дозволяє відслідковувати частоту і фазу сигналу від кожної мобільної станції.

8. Крім послуг з комутацією каналів підтримуються послуги з комутацією пакетів.

9. Передбачено для каналного кодування використання 128 кодів розширення (*Walsh code*), що дозволяє організувати в 2 рази більше низько швидкісних каналів (наприклад, голосових з'єднань).

10. За рахунок об'єднання частотних каналів смуга частот може змінюватися від 1,25 МГц до 15 МГц (запропоновані наступні значення: 1X, 3X, 6X, 9X та 12X, де X = 1,25 МГц).

Необхідні наступні зміни для переходу від *cdmaOne* до *CDMA2000*:

- на елементах системи комутації *MSC*, *VLR*, *HLR* повинно бути виконано оновлення програмного забезпечення для того, щоб базова мережа могла забезпечувати процедури автентифікації та авторизації пакетних з'єднань;

- оновлення апаратного забезпечення має бути проведено для базових станцій (*BTS*), що пов'язано з істотними змінами радіоінтерфейсу;

- повинен бути замінений прийомопередавач мобільного терміналу з тих же причин.

- оновлення програмного забезпечення має бути проведено для контролера базових станцій (*BSC*) для роздільної адресації сигналів з комутацією каналів і пакетів у відповідні домени.

- ведення до складу мережі нового домену для комутації пакетів (маршрутизатора та елементів автентифікації).

Архітектура мережі стандарту *CDMA2000*

До складу основних елементів мережі *CDMA2000* входять (рис.22.7):

- мобільна станція (*MS - MobileStation*) – це може бути мобільний телефон, радіомодем тощо;
- мережа радіодоступу (*RAN - Radio Access Network*) – це вхідна точка абонента до мережі оператора;
- мережа комутації (*NSS - NetworkSwitchingSystem*) – забезпечує комутацію голосових з'єднань абонентів;
- мережа пакетної комутації (*PCN - PacketCoreNetwork*) – відповідає за передачу (маршрутизацію) даних з пакетною комутацією, призначення *IP*- адресів, автентифікацію тощо.

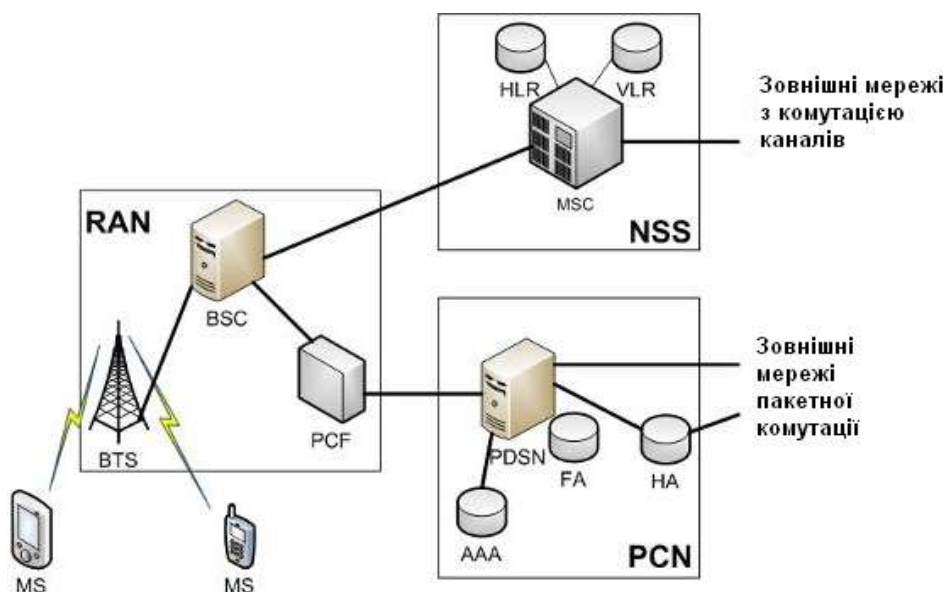


Рис.22.7. Архітектура мережі стандарту *CDMA2000*

Базова станція (*BTS*) – служить інтерфейсом між мережею і мобільними пристроями, виконує всі перетворення в радіоканалі, здійснює управління радіо ресурсами (наприклад, призначення частотних каналів, розподіл стільників, управління потужністю передачі тощо). На додаток до цього, *BTS* організовує наскрізні з'єднання для проходження трафіку між *MS* і *BSC* для забезпечення мінімальних часових затримок у процесі передачі даних користувача та сигналізації.

Контролер базових станцій (*BSC*) - передає дані голосових повідомлень та сигналізації та між стільниками та *MSC* (*Mobile Switching Centre*), виконує деякі процедури пов'язані з мобільністю абонентів (наприклад, контролює процедуру хендовера).

Пристрій контролю пакетних з'єднань (*PCF - PacketControlFunction*) – це новий елемент мережі *CDMA2000*, якого не було в мережах *cdmaOne*. Його головним завданням є маршрутизація пакетів між *BTS* і *PDSN*. В процесі пакетної сесії *PCF* призначає доступні радіоресурси для абонентів мережі відповідно до їх потреб і сплачених обсягів послуг. Головне завдання *PCF* полягає в плануванні розподілу ресурсів мережі доступу (розподіл каналів, контроль черги тощо), так щоб вони могли бути максимально ефективно використані і при цьому не допустити зниження якості наданих послуг.

Вузол *PDSN* являє собою шлюз між підсистемою радіодоступу і мережею *Internet* (або мережами *Intranet*). Вузол здійснює транспортування даних, відповідає за встановлення, підтримку і розрив з'єднань з мобільними станціями (терміналами доступу).

Сервер *AAA* (*Authentication, Authorization, Accounting*) використовується для проведення процедур автентифікації та авторизації абонентів, а також для зберігання абонентських даних з метою білінгу та виставлення рахунків.

Домашній агент (*HA – Home Agent*) забезпечує «безшовний» роумінг до інших мереж стандарту *CDMA2000*, надає фіксований *IP*-адрес для *MS*, який призначений для передачі будь-яких даних користувача через первинну мережу, підтримує реєстрацію абонентів, передачу пакетів до *PDSN*, а також створення захищеного з'єднання (опціонально).

Гостьовий агент (*FA – Foreign Agent*) надає доступ до внутрішніх ресурсів «гостьовій» мережі.

«Домашній» і «гостьовий» агенти являють собою аналог «домашнього» (*HLR*) і відповідно «гостьового» (*VLR*) реєстрів підсистеми комутації каналів. Це обладнання відповідає за реєстрацію абонентських терміналів для надання прав доступу в мережу передачі даних через різні пристрої *PDSN*.

Основні характеристики радіоінтерфейсу CDMA2000-1X

Табл. 22.7

№ з/п	Характеристики	Значення
1	Діапазон частот	IS-95: 824...849 МГц (<i>UL</i>), 869...894 МГц (<i>DL</i>) NMT-450: 453...457,5 МГц (<i>UL</i>), 463...467,5 МГц (<i>DL</i>) IMT-2000: 1920...1980 МГц (<i>UL</i>), 2110...2170 МГц (<i>DL</i>)
2	Дуплексна схема	<i>FDD</i>
3	Рознесення каналів	1,25 МГц
4	Тип модуляції	<i>BPSK (UL)</i> <i>QPSK (DL)</i>
5	Технологія множинного доступу	<i>CDMA</i>
6	Види комутації	Комутація каналів та пакетів
7	Символьна(чіпова) швидкість	1,2288 Мчіп/с
8	Швидкість передачі даних	до 153,6 кбіт/с (<i>Rel 0</i>) до 307,2 кбіт/с (<i>Rel A</i>)
9	Кодування мови (тип кодека)	8 кбіт/с або 13 кбіт/с зі змінною швидкістю (<i>CELP</i>) 8 кбіт/с зі змінною швидкістю (<i>EVRC</i>)
10	Тип хендовера	м'який та жорсткий (між частотний)
11	Робоче співвідношення сигнал/шум на вході приймача	≥6 дБ
12	Джерело синхронізації	<i>GPS</i>
13	Організація, що підтримує стандарт	<i>3GPP2</i>

Канальна структура

Прямі канали поділяються на:

- канали трафіку:

- основний (*F-FCH*) – для передачі користувачу даних голосового повідомлення;
- додатковий (*F-SCH*) – для передачі користувачу даних на більш високих швидкостях;
- додатковий кодований (*F-SCCH*) – для передачі даних повідомлень та управління.

- канали керування (сигналізації):

- загальні канали (11 шт.) – для передачі пілот-сигналів, синхронізації, загальних сигналів управління і регулювання потужністю тощо;
- виділений канал – для передачі даних управління.

Зворотні канали поділяються на:

- канали трафіку:

- основний (*R-FCH*)
- додатковий (*R-SCH*)
- додатковий кодований (*R-SCCH*)

- канали керування:
 - загальні канали (4 шт.);
 - виділений канал.

Для прямого каналу трафіку визначені 10 варіантів радіоконфігурацій (різних наборів параметрів модуляції, схем кодування та розширення спектру, форматів кадру, чіпових швидкостей тощо), для зворотного – 7. Радіоконфігурація динамічно визначається мережею відповідно до стану радіоканалу з абонентом.

Табл.22.8

RC	SR	Вид модуляції та швидкість кодування	Швидкість, кбіт/с
RC1	1	BPSK, $R=1/2$	1,2;...9,6
...			
RC5	1	BPSK, $R=1/4$	1,8;...230,4
...			
RC9	3	BPSK, $R=1/2$ та $R=1/3$	1,8;...1036,8
RC10	1	QPSK, 8PSK, 16QAM, $R=1/5$	43,2;...3091,2

SR-формат чіпової швидкості (**SR** =1 – для 1,2288Мчп/с; **SR** =3 – для 3,6864 Мчп/с).

Стандарт CDMA2000 передбачає наступні види передачі обслуговування («хендоверу»):

- «м'який» внутрішньо системний (технологія MAHO – *Mobile Assisted Handoff*) за участю мобільної станції;
- «м'який» міжсекторний;
- «жорсткий» міжсистемний (переключення в інші мережі або частотні діапазони).

Еволюція мереж CDMA2000

Цей стандарт є першою фазою розвитку 3G в системі стандартів cdma2000 з подальшим переходом до високошвидкісних стандартів - cdma2000 1X EV-DO та cdma2000 1X EV-DV(рис.22.8).

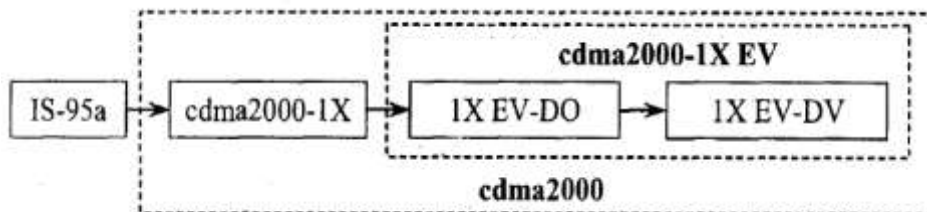


Рис.22.8. Еволюція CDMA2000

Перехід до наступної фази **CDMA2000-1xEV-DORev.0** (англ. *Evolution Data Optimized*) відбувається при використанні тієї ж смуги частот - 1,25 МГц. На відміну від EV-DV (*Evolution Data/Voice*) змінився тільки інтерфейс передачі даних, а передача голосу залишилася повністю ідентичною CDMA2000-1X та cdmaOne(IS-95A/B). При цьому

забезпечується швидкість передачі до 2,4 Мбіт/с у прямому каналі і до 153 кбіт/с - в зворотному, що відповідає вимогам технологій мереж 3G і дає можливість надавати більш широкий спектр послуг, в тому числі передачу відео в режимі реального часу.

Наступною фазою (релізом) розвитку стандарту у напрямку збільшення швидкості передачі даних є **CDMA20001xEV-DO Rev A**: передача даних із швидкістю до 3,1 Мбіт/с в напрямку до абонента і до 1,8 Мбіт/с - від абонента.

Фаза **1xEV-DO Rev B**, забезпечує в одному частотному каналі 1,25 МГц швидкість 4,9 Мбіт/с до абонента і 2,4 Мбіт/с від абонента. До того ж передбачається можливість об'єднання декількох частотних каналів для збільшення швидкості. Наприклад, об'єднання 15-ти частотних каналів (максимально можлива кількість) дозволить досягати швидкостей 73,5 Мбіт/с до абонента і 27 Мбіт/с від абонента.

Реліз *EV-DO*, який отримав манкіровку **Rev. C**, об'єднує в собі такі мобільні технології як *CDMA*, *TDMA*, *OFDM*, *MIMO* та *SDMA* (*Space Division Multiple Access*).

Залежно від типу інформації, що передається, використовується адаптивна модуляція, що впливає на швидкість передачі даних. Система оцінює розмір кодованого пакету, стан радіоінтерфейсу і призначає відповідно до цього модуляцію: *QPSK*, *8-PSK*, *16-QAM* або *64-QAM*.

Таким чином, швидкість передачі даних в *CDMA2000EV-DO*, залежно від версій (релізів) стандарту, досягає (*DownLoad/UpLoad*):

- *Rev.0* - 2,4/0,153 Мбіт/с;
- *Rev.A* - 3,1/1,8 Мбіт/с;
- *Rev.B* - 4,9/1,8 Мбіт/с...73,5/27 Мбіт/с (при об'єднанні до 15 каналів);
- *Rev.C* - 280/75 Мбіт/с;
- *Rev.D* - 500/120 Мбіт/с

22.6. Архітектура мережі *LTE*

3GPP Long Term Evolution або просто **LTE** (з англ. *Long Term Evolution* — довго строковий розвиток) — назва мобільного протоколу передачі даних. Цей проект 3GPP є еволюцією мереж стільникового зв'язку третього покоління *UMTS* для задоволення майбутніх потреб у швидкостях передачі даних. **LTE Advanced**, під яким розуміються релізи стандарту *LTE* № 10 і більш пізніші, був затверджений Міжнародним Союзом Електрозв'язку як стандарт безпроводових мереж зв'язку четвертого покоління.



Учасники проекту 3GPP визначили архітектуру мережі *LTE* на базі *IP*-протоколу як частину програми розвитку архітектури системи — *System Architecture Evolution* (**SAE**). Призначенням архітектури *LTE/SAE* є ефективна підтримка будь-якої *IP*-послуги для широкого комерційного

використання. Розвиток мереж *LTE* можливий на базі вже існуючих мереж як операторів *2G (GSM/GPRS/EDGE)*, так і операторів *3G (WCDMA, CDMA2000)*, що помітно знижує вартість та ризики розгортання мереж *LTE* (на відміну від мереж *WiMax*).

Особливості мереж стандарту *LTE*:

- здатні працювати практично по всій ширині спектра частот - від 700 МГц до 2,7 ГГц;
- передбачено застосування різних частотних каналів - від 1,4 МГц до 20 МГц;
- технології дуплексу - *FDD* або *TDD*;
- версія релізу *Rel.8* передбачає можливість одночасної роботи до 200 активних користувачів в кожному стільнику при використанні смуги 5 МГц;
- теоретична швидкість передачі досягає:
 - у «прямому каналі» (*download*) шириною 20 МГц з *MIMO4x4* - 326,4 Мбіт/с;
 - у «зворотному каналі» (*upload*) - 172,8 Мбіт/с;
 - для конфігурації *2x2* відповідні граничні швидкості в 2 рази менше;
 - радіус дії базової станції може бути різним залежно від потужності і діапазону частот, які використовуються (в оптимальному випадку - це приблизно 5 км, але при необхідності дальність дії може складати 30 км);
 - мережа підтримує *MBSFN (Multicast Broadcast Single Frequency Network)*, що дозволяє впроваджувати такі послуги, як мобільне телебачення.

Архітектура мережі *LTE* складається з наступних основних елементів (рис. 22.9):

- мережі радіодоступу ***E-UTRAN***, до складу якої входять базові станції ***eNB (evolved Node B)***;
- базової мережі ***SAE (System Architecture Evolution)***, яку ще називають ***EPC (Evolved Packet Core)***, що містить:
 - вузол управління мобільністю ***MME/UE (Mobility Management Entity)*** - призначений для керування мобільністю, тому числі для здійснення «естафетної передачі» (хендовера) між базовими станціями мережі *LTE*, а також мереж другого та третього покоління даного оператора;
 - шлюзові вузли прив'язки ***SAE Anchor*** та ***3GPP Anchor***, які утворюють єдиний вузол прив'язки ***IASA (Inter Access System Anchor)*** для підключення зовнішніх *IP*-мереж.

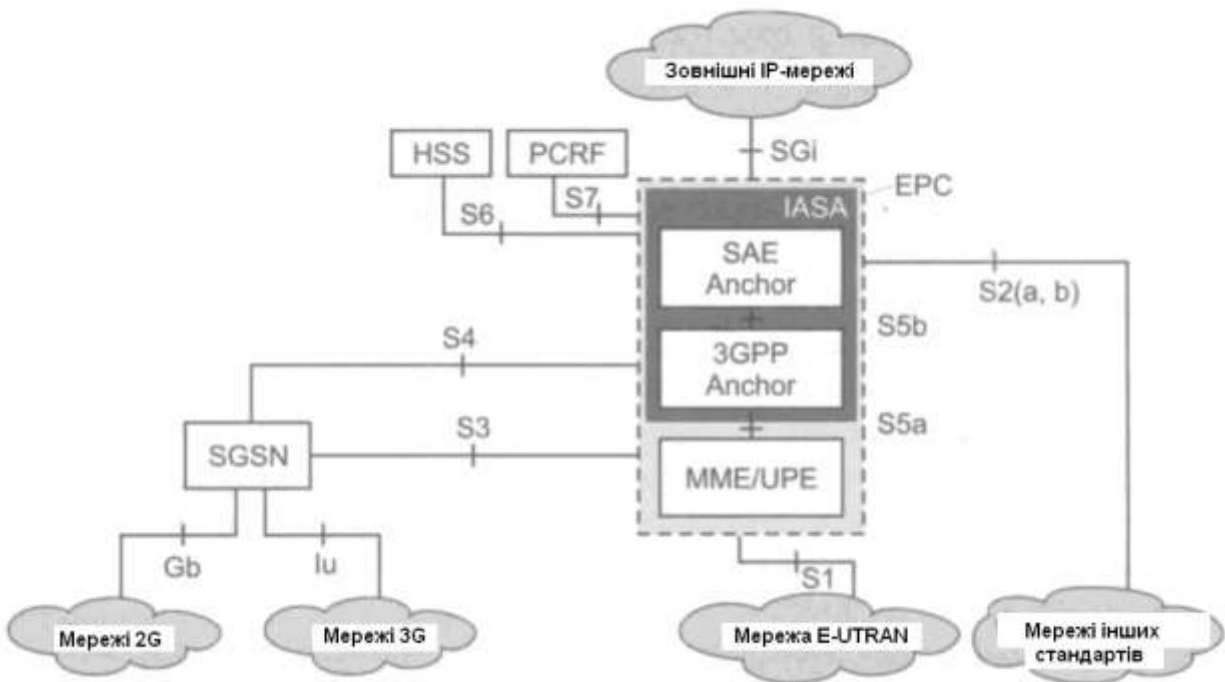


Рис. 22.9. Типова архітектура базової мережі *LTE/SAE*

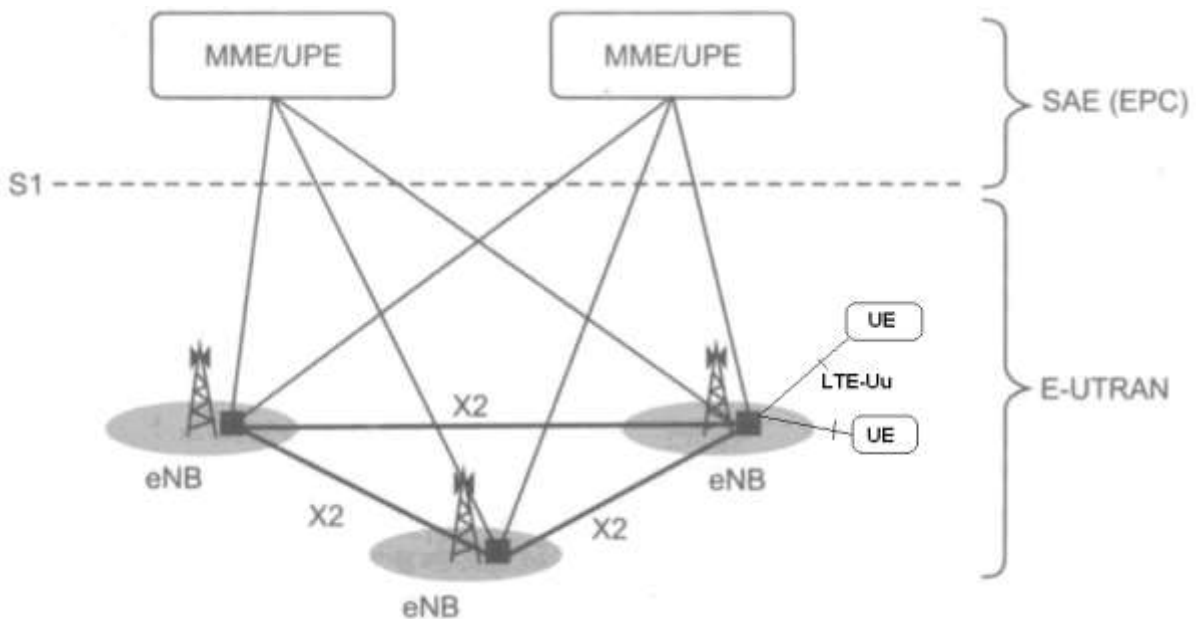


Рис. 22.10. Взаємодія мереж *E-UTRAN* та *SAE*

Шлюзові вузли прив'язки реалізуються на базі наступних елементів:

- *Serving SAE Gateway* або просто ***Serving Gateway (SGW)*** — шлюз обслуговування мережі *LTE*. Призначений для обробки і маршрутизації пакетних даних, які поступають із/до підсистеми базових станцій. По суті, він замінює *MSC*, *MGW* і *SGSN* мережі *UMTS*. *SGW* має пряме з'єднання з мережами другого і третього покоління того ж оператора, що значно спрощує передачу з'єднання із причин погіршення зони покриття, перевантажень тощо.
- *Public Data Network (PDN) SAE Gateway* або просто ***PDN Gateway (PGW)*** — шлюз до/від мереж інших операторів. Якщо

інформація (голос, дані) передаються із/до мережі даного оператора, то їх маршрутизація здійснюється саме через *PGW*.

Шлюзи ***Serving Gateway*** і ***PDN Gateway*** можуть бути реалізовані в складі одного мережевого елемента ***aGW*** (*Access GW*).

Призначення інших елементів мережі *SAE*:

- ***Home Subscriber Server (HSS)*** — сервер абонентських даних, що об'єднує функції *VLR*, *HLR*, *AUC*.

- ***Policy and Charging Rules Function (PCRF)*** — вузол білінгу (виставляння рахунків абонентам за надані послуги зв'язку).

Відповідно до архітектури мережа повинна забезпечувати взаємодію з наступними мережами радіодоступу:

- мережі проекту *3GPP*:

- *E-UTRAN* (стандарт *LTE*);

- *UTRAN* (стандарти *3G - UMTS, CDMA2000*);

- *GERAN* (стандарт *2G - GSM*);

- мережі, що не відносяться до проекту *3GPP* (*Wi-Fi, WiMAX* тощо).

Взаємодія мережі *LTE* з мережами *3GPP* більш ранніх стандартів з метою надання традиційних послуг телефонії здійснюється у відповідності з архітектурою голосових викликів *SRVCC (Single Radio Voice Call Continuity)*, представленою в специфікації *3GPP TS 23.216*. Згідно даній архітектурі голосові виклики в мережах *3GPP* можуть здійснюватися за допомогою як традиційної технології комутації каналів *TDM*, так і за допомогою технології комутації пакетів на базі підсистеми *IMS*.

Алгоритми взаємодії мережі *LTE* з мережами інших стандартів, відмінних від *3GPP* (далі *non-3GPP*), можна розділити на алгоритми взаємодії з мережами з гарантованою безпекою («надійними», англ. *trusted*) і алгоритми взаємодії з мережами з негарантованою безпекою («не надійними», англ. *non-trusted*). В якості «надійних» мереж можуть бути мережі операторів інших стандартів (наприклад, мережі *CDMA2000, WiMAX*), в якості «не надійних» - публічні *IP*-мережі Інтернет. Взаємодія мережі *LTE* з «надійними» мережами стандартів *non-3GPP* здійснюється за допомогою шлюзу *PDN GW*, взаємодія з «не надійними» мережами - за допомогою шлюзу *ePDG*.

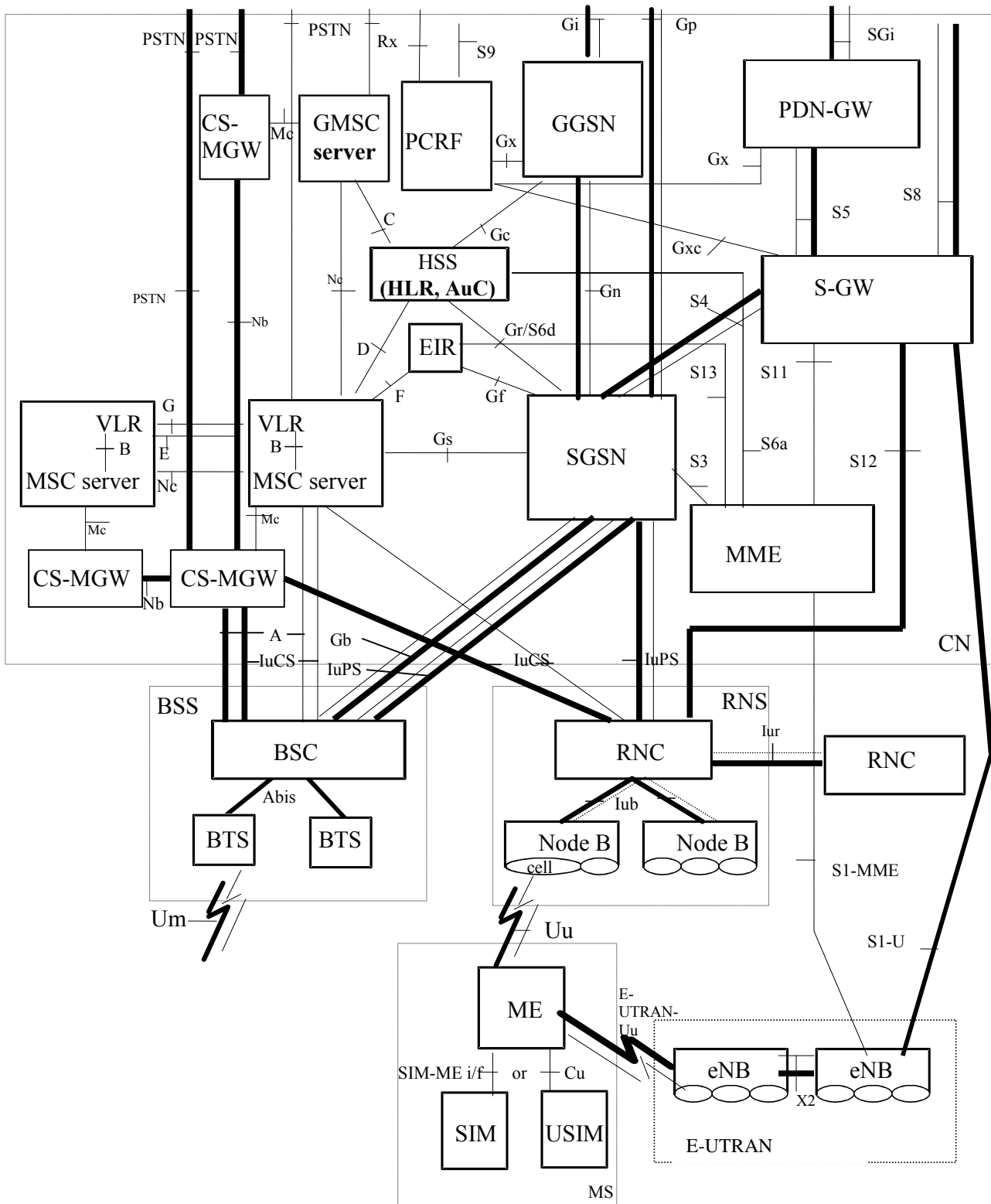


Рис. 22.11. Деталізована архітектура суміщеної мережі GERAN/UMTS/LTE

Особливості радіоінтерфейсу LTE

Радіоінтерфейс LTE підтримує обидва методи дуплексного розділення каналів: частотний FDD і часової TDD.

Лінія «вниз» E-UTRAN

Особливістю радіоінтерфейсу в прямому каналі мережі E-UTRAN є використання технології множинного доступу OFDMA, що забезпечує високу гнучкість розподілу і масштабованість радіоресурсів для каналів передачі даних із різною смугою пропускання. При цьому підтримуються наступні види модуляції: QPSK, 16QAM і 64QAM. Передбачається використання технології MIMO, основна конфігурація якої припускає використання двох передавальних і двох приймальних антен базової станції і мобільного терміналу.

Крім модуляції OFDM/QAM в прямому каналі передбачається використання перспективної модуляції OFDM/OQAM. Модуляція OFDM/OQAM, на відміну від вже стала традиційною модуляції OFDM, не вимагає наявності захисних інтервалів (циклічних префіксів). Квадратурна амплітудна маніпуляція зі зсувом Offset QAM (OQAM) значно підвищує ефективність використання спектру за рахунок зменшення інтерференційних міжсимвольних завад.

Важливою відмінністю OFDM/OQAM від класичного сигналу OFDM є використання багатофазної фільтрації після зворотного дискретного швидкого перетворення Фур'є IFFT ((Inverse Fast Fourier Transform), що виключає використання циклічних префіксів. При цьому швидкість передачі сигнальних символів подвоюється. Одним із спрощених варіантів багатофазної фільтрації (функції IOTA), що забезпечує ортогональність сигналів, є гаусівська функція в часовій та частотній областях. Завдяки функції IOTA відбувається локалізація спектру (виходить більш крутий спад порівняно з класичним OFDM), в результаті чого зменшуються інтерференційні і внутрішньо системні завади в мережі.

Передбачається використання наступних фізичних каналів:

- PDSCH (Physical downlink shared channel) – розподілений фізичний канал лінії «вниз»;
- PDCCH (Physical downlink control channel) – фізичний канал управління лінії «вниз»;
- CCPCCH (Common control physical channels) – загальний фізичний канал управління.

В E-UTRAN для LTE визначені наступні транспортні канали лінії «вниз»:

- BCH (Broadcast Channel) – трансляційний канал;
- PCH (Paging Channel) – канал виклику;
- DL-SCH (Downlink Shared Channel) – суміщений канал лінії «вниз»;
- MCH (Multicast Channel) – трансляційний канал в групі.

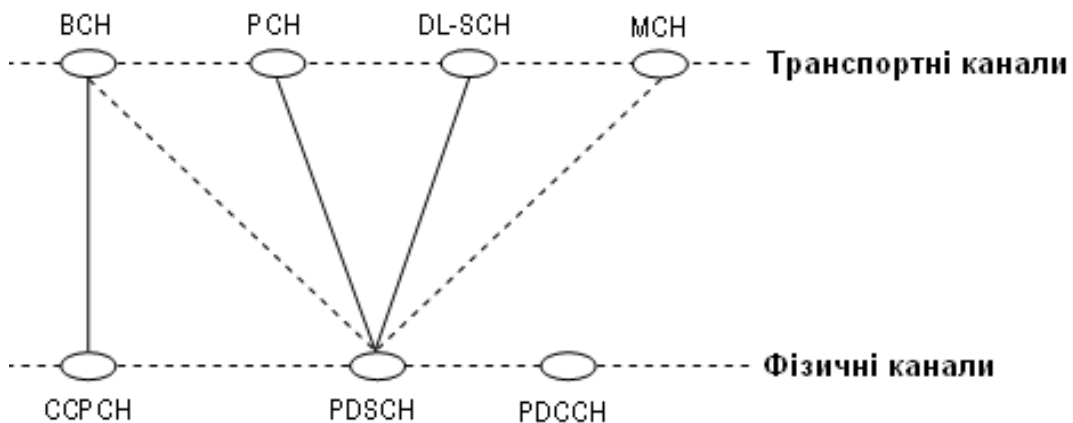


Рис.22.12. Взаємодія фізичних та транспортних каналів в лінії «вниз» в E-UTRAN

Як видно з рис.22.12, розвиток мереж LTE направлено на максимальне, де можливо, спрощення протоколів обміну інформацією.

Лінія «вгору» E-UTRAN

Особливістю радіоінтерфейсу зворотного каналу мережі E-UTRAN є використання технологій множинного доступу SC-FDMA (*Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*) з однією несучою частотою і середньої потужності передачі PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*).

Зменшення взаємного впливу користувачів досягається введенням циклічних префіксів та використанням ефективних еквалайзерів в приймальних пристроях. Основна конфігурація антен при використанні MIMO припускає використання двох передавальних антен на мобільному терміналі і двох прийомних антен на базовій станції. В процесі модуляції OFDM в технології множинного доступу SC-FDMA використовується дискретне перетворення Фур'є (DFT).

Передбачається використання наступних фізичних каналів:

- PRACH (*Physical random access channel*) – фізичний канал довільного (випадкового) доступу;
- PUCCH (*Physical uplink control channel*) – фізичний канал управління лінії «вгору»;
- PUSCH (*Physical uplink shared channels*) – фізичний розподілений канал лінії «вгору»

В E-UTRAN для LTE визначені наступні транспортні канали лінії «вгору» :

- RACH (*Random Access Channel*) – канал випадкового доступу;
- UL-SCH (*Uplink Shared Channel*) – розподілений канал лінії «вгору»

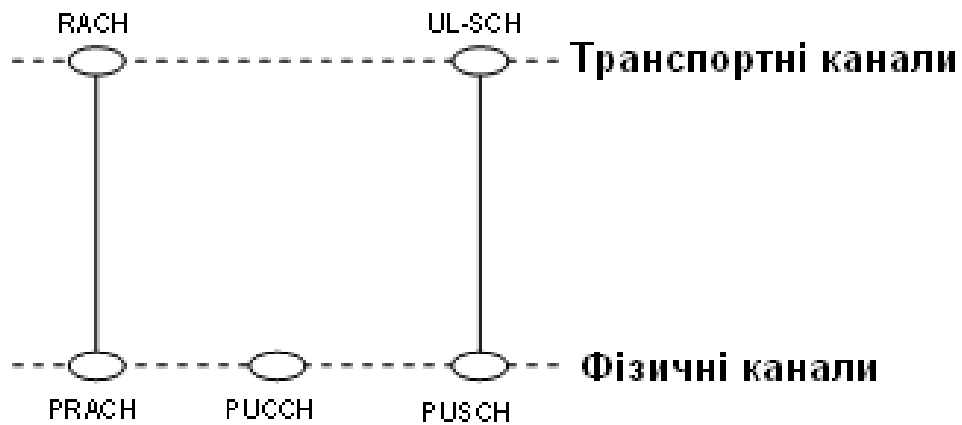


Рис. 22.13. Взаємодія фізичних та транспортних каналів в лінії «вгору» в *E-UTRAN*

Для управління якістю в мережах *LTE* використовують дві множини, що перетинаються та складаються з параметрів якості функціонування мережі (*Network Performances*) і параметрів якості послуг **QoS** (*Quality of Service*). Кожному з'єднанню в мережі *LTE* і радіоінтерфейсу *E-UTRAN* відповідає деяка сукупність узгоджених параметрів функціонування мережі, що пов'язує воедино всі аспекти QoS, зокрема швидкість передачі даних, затримку пакетів, джітер, відносне число помилково прийнятих пакетів, доступність мережі тощо.

При розрахунках пікової швидкості передачі даних враховувалася кадрова структура прямого та зворотного каналів (циклічні префікси, часові і частотні захисні інтервали, контрольні символи), види модуляції і завадостійкого кодування тощо.

Питання самоконтролю до III розділу

1. Склад архітектури стільникової мережі стандарту GSM та призначення основних елементів.
2. Назвіть основні характеристики стандарту GSM.
3. Поясніть принцип повторного використання частот в стільниковому зв'язку.
4. Поясніть організацію в стандарті GSM частотних і фізичних каналів.
5. Класифікація та призначення логічних каналів в стандарті GSM.
6. Структурна схема та призначення елементів базової приймально передавальної станції.
7. Структурна схема та призначення елементів контролера базових станцій.
8. Структурна схема та призначення елементів комутаційної підсистеми.
9. Поясніть способи кодування мови.
10. Як оцінюється якість кодування мови?
11. Призначення каналного кодування та його основні етапи.
12. Які способи керування потужністю застосовують в стільникових мережах?
13. Поясніть порядок автентифікації в мережах GSM.
14. Як забезпечується шифрування даних в мережах GSM?
15. Поясніть процедуру обслуговування виклику в мережах GSM.
16. Архітектура та основні характеристики стандарту CDMAone(IS-95).
17. Структура та призначення прямих та зворотних каналів в стандарті IS-95.
18. Поясніть за рахунок чого в технології GPRS підвищується швидкість передачі.
19. Поясніть особливості технології EDGE.
20. Архітектура та призначення елементів в стандарті WCDMA.
21. Основні технічні характеристики радіоінтерфейсу WCDMA.
22. Основні технічні характеристики радіоінтерфейсу CDMA2000.
23. Назвіть основні функції підсистеми UTRAN.
24. Поясніть особливості стандарту LTE.
25. Архітектура мереж LTE та призначення основних елементів.
26. Як в мережах LTE передбачена взаємодія з мережами другого та третього покоління?

ЧАСТИНА IV. Системи радіотелефонії та безпроводового доступу

23. Мережі безпроводового радіотелефонного зв'язку.

23.1. Загальні відомості.

Системи безпроводового доступу часто називають системами бездротових телефонів, оскільки первинне застосування таких систем в основному зводилося до їх використання в якості бездротових абонентських закінчень або радіоподовжувачів ліній стаціонарного телефонного зв'язку. Системи бездротових телефонів спочатку розвивалися в національних рамках. Перші системи бездротових телефонів з'явилися в 70-х роках у Європі, Азії і Північній Америці та працювали в діапазоні частот 28...50 МГц. Найпростіший бездротовий телефон містить *базовий радіоблок*, який через стандартний двопроводовий або чотирипроводовий інтерфейс (пристрій сполучення) підключається до АТС стаціонарної телефонної мережі, і *переносний портативний абонентський термінал* (слухавку). Зв'язок між базовим радіоблоком (базовою станцією) і абонентським терміналом здійснюється по радіоканалу з використанням частотної модуляції. Дальність бездротового телефонного зв'язку в таких системах залежить від багатьох факторів і може складати від десятків метрів до декількох кілометрів.

Типова архітектура системи безпроводового радіотелефонного зв'язку представлена на рис. 23.1. Вона містить у собі наступні основні компоненти: контролер базових станцій, базові станції (БС), радіоретранслятори, абонентські термінали і термінал технічного обслуговування та експлуатації (комп'ютер зі спеціальним програмним забезпеченням).

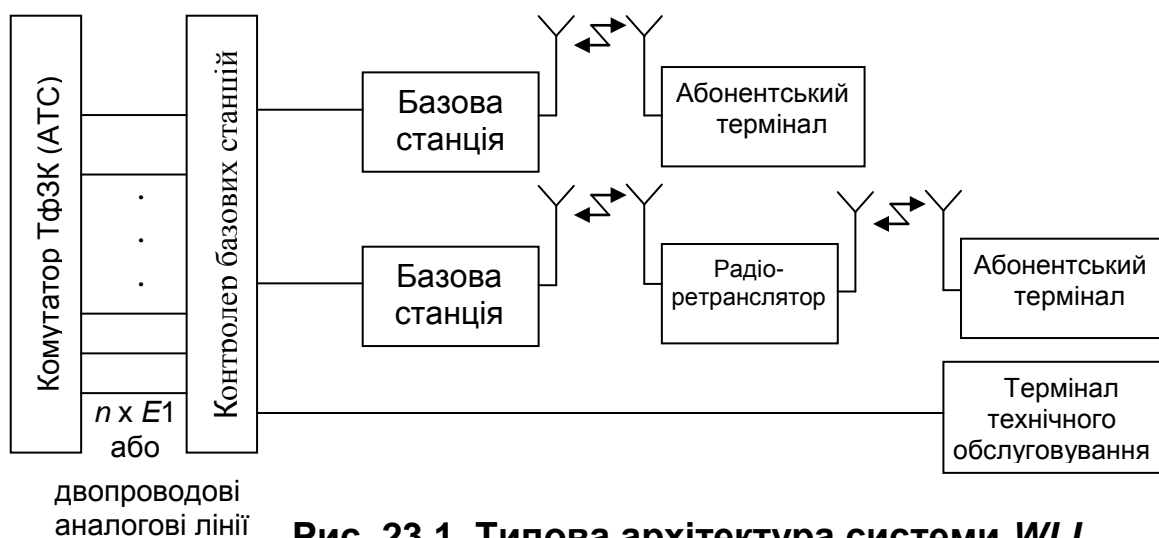


Рис. 23.1. Типова архітектура системи WLL

БС зв'язані з контролером проводовими або безпроводовими лініями зв'язку. Останні можуть бути реалізовані на базі досить великого числа радіоретрансляторів. Подібні ретранслятори іноді використовуються між абонентськими терміналами і БС, збільшуючи дальність дії останніх.

У простих системах безпроводового радіотелефонного зв'язку індивідуального призначення контролер розміщується сумісно з радіоблоком базової станції.

Поняття «системи безпроводового зв'язку» **WLL** (*WireLess Loops*) з'явилося порівняно недавно – в середині 90-х років. Системи **WLL** часто називають *системами безпроводового радіодоступу до АТС, або бездротової телефонії*.

Можна виділити два види безпроводових абонентських систем зв'язку:

- вузькосмугові (є альтернативою існуючих телефонних ліній зв'язку);
- широкосмугові (забезпечують передачу телевізійних сигналів, двосторонні високошвидкісні послуги передачі мови і даних по радіоканалам).

23.2. Вузькосмугові системи безпроводового абонентського радіодоступу.

Вузькосмугові системи безпроводового абонентського радіодоступу можна поділити на три категорії:

- системи, що підтримують стандарти бездротової телефонії (*DECT, CT 2, PHS* тощо).
- цифрові й аналогові системи, які реалізовані на базі технології стандартів стільникового мобільного зв'язку (*NMT-450/900, D-AMPS, CDMA* тощо).
- фірмові аналогові і цифрові системи, які призначені для забезпечення радіотелефонного зв'язку.

Системи на базі стандартів бездротової телефонії

Перші системи бездротових телефонів забезпечували побутове або резидентне застосування бездротового телефонного зв'язку (у межах квартири, будинку, невеликого офісу). При використанні мобільного терміналу абонент мав можливість як з'єднатися з АТС, так і приймати вхідні виклики з АТС. Ці системи бездротових телефонів являли собою дуже різноманітні розробки окремих компаній. Для таких систем були визначені вимоги до радіоінтерфейсу і до параметрів стику з АТС, які можна розглядати як перші елементи стандартизації систем бездротових телефонів.

На початку 90-х років Європейською конференцією адміністрацій пошт і зв'язку (*CEPT*) був розроблений перший офіційний стандарт **CT1**

на системи бездротових телефонів у діапазоні частот 900 МГц. В системах *СТ1* використовується частотна модуляція і множинний доступ з *частотним розподілом каналів (FDMA)*. Усього в системі *СТ1* є 40 дуплексних радіоканалів. Зв'язок радіоабонентів здійснювався тільки через індивідуальну базову станцію з використанням свого індивідуального базового коду. Загальна кількість кодів – більше мільйона. 40 дуплексних каналів виявилися недостатніми для використання систем бездротових телефонів стандарту *СТ1* у діловій сфері, оскільки сучасний бізнес надзвичайно динамічний і вимагає миттєвої доступності абонентів. У Німеччині, Австрії і Швейцарії, за узгодженням із *CEPT*, був прийнятий розширений стандарт *СТ1+* з подвоєною кількістю каналів - 80. Завдяки цьому системи стандарту *СТ1+* змогли забезпечити застосування бездротових телефонів у бізнес - секторі з більш складною схемою організації зв'язку, ніж у резидентних системах. Будинки офісу або велике підприємство охоплювалися не одним, а декількома осередками зі своєю базовою станцією в кожному осередку, які, у свою чергу, замикалися на центральний блок керування, зв'язаний з відомчою АТС.

Недоліки аналогових стандартів:

- мала кількість каналів, а отже, неможливість обслуговування в умовах великої щільності абонентів;
- погана захищеність від несанкціонованого прослуховування переговорів і несанкціонованого використання телефону.

Переваги аналогових стандартів:

- низька вартість, що може бути визначальним фактором, коли не пред'являються жорсткі вимоги до безпеки зв'язку.

Наступне покоління систем бездротових телефонів було розроблено у Великобританії. Новий стандарт, що одержав позначення *СТ2*, є цифровим стандартом і забезпечував кращу якість передачі мови і більший обсяг наданих послуг.

У стандарті *СТ2* використовувався множинний доступ з *частотним розподілом (FDMA)* і *часовий дуплексний розподіл режимів передачі і прийому (TDD)*. У порівнянні з попередніми стандартами забезпечувалося більш ефективне використання смуги частот, тому що обмін повідомленнями здійснювався на одній частоті. Безпека зв'язку в стандарті *СТ2* значно вища, ніж в аналогових стандартах. Крім того, устаткування стандарту *СТ2* може забезпечувати передачу обслуговування мобільних абонентських терміналів між базовими блоками, що дозволяє розширити зону обслуговування.

Стандарт *СТ2* був прийнятий за основу при створенні системи типу **Telepoint**, призначеної для зв'язку мобільних абонентів з абонентами фіксованої телефонної мережі. У буквальному перекладі *Telepoints* (англ.) означає телефонні пункти. Система передбачає встановлення базових станцій (блоків) в громадських місцях міста, на перехрестях вулиць, у торгових центрах, вокзалах, аеропортах тощо. Зв'язок у

системах *Telepoint* здійснюється в зоні дії базової станції з дальністю до 200 метрів. Концепція *Telepoint* одержала в Європі широке поширення. Ця система в розробці компанії *British Telecom* одержала назву *Phonepoint*. Компанія *Ferranti* (Великобританія) на її основі розробила аналогічну систему *Zonephone*. Концепція *Telepoint* у Німеччині знайшла відображення в організації служби *Birdie*. Для спільної роботи абонентських апаратів у системах типу *Telepoint* різних виробників 10 країн Європи прийняли єдиний *CT2*-радіоінтерфейс, що одержав назву *CAI (Common Air Interface)*. Протоколи *CAI* були прийняті Європейським інститутом стандартів зв'язку (*ETSI*) і одержали позначення *ETS – 300 131* (1989 рік).

Переваги стандарту (CT2):

- власники зареєстрованих абонентських терміналів можуть використовувати телефонний зв'язок без обмежень із застосуванням одного терміналу скрізь (в будинку, в офісі, бізнес-центрі, на вулиці і т.і.);
- динамічний розподіл каналів, що забезпечує вибір для зв'язку одного з доступних сорока каналів з найменшим рівнем завад і зміну каналу в процесі передачі повідомлень.

Недоліки стандарту (CT2):

- відсутність функції передачі даних.

У 1992 році *ETSI* був прийнятий стандарт *ETS – 300 175* на загальноєвропейські системи безпроводового зв'язку ***DECT (Digital European Cordless Telecommunications)***, призначений для передачі мовних повідомлень і даних. У стандарті *DECT* використовується часовий *множинний доступ (TDMA)* у сполученні з *часовим дуплексним розподілом режимів передачі і прийому (TDD)*. Технічні рішення і служби в стандарті *DECT* близькі до прийнятого в стандарті *GSM*. Зокрема, у *DECT*, як і в *GSM*, передбачається:

- взаємодія з цифровими мережами з інтеграцією служб (*ISDN*);
- підключення до абонентського апарату терміналу передачі даних;
- застосування інтелектуальних абонентських карт тощо.

Перша система цифрового безпроводового зв'язку, близька до *DECT*, була розроблена і впроваджена концерном *Ericsson* (Швеція). Ця система одержала назву *PKE-DECT* або *DCT-900*.

Технічні характеристики систем безпроводового зв'язку стандартів *CT1*, *CT2* і *DECT* приведені в таблиці 23.1.

MC/TDMA/TDD – технологія, що забезпечує не тільки динамічний частотно-часовий розподіл каналів (*TDMA*) із використанням декілька несучих частот (*MC-Multi Carrier*), але і передачу в одному частотному каналі сигналів базової та мобільних станцій, використовуючи різні часові інтервали (*TDD*).

Для перетворення аналогового мовного сигналу в цифровий використовується *адаптивна диференціальна імпульсно-кодова модуляція (ADPCM)*, що відповідає стандарту МСЕ *G.721*.

Таблиця 23.1.

Параметр	CT 1/CT1+	CT 2	DECT
Початок експлуатації	1988	1990	1992...1994
Частотний діапазон, МГц	825...837	864...868	1880...1900
Метод доступу	FDMA/FDD	FDMA/TDD	MC/TDMA/TDD
Рознесення каналів, МГц	0,025/0,0125	0,1	1,728
Кількість несучих частот	40/80	40	10
Максимальна кількість каналів на одній несучій частоті	1	1	12 дуплексних
Загальна ємність каналів зв'язку	40/80	40	120
Пікова потужність абонентського передавача, мВт	-	10	250
Середня потужність абонентського передавача, мВт	-	5	10
Швидкість передачі даних мови, кбіт/с	-	32	32
Швидкість передачі даних у каналі, кбіт/с	-	72	1152
Метод кодування мови	-	ADPCM (G.721)	ADPCM (G.721)
Метод модуляції	FM	GFSK	GMSK
Радіус зони зв'язку, м	до 100	до 200	50 ...150

Компанією *BELLCORE* (США) була розроблена система безпроводового зв'язку загального доступу **PACS** (*Public Access Communication System*), яка була призначена для організації безпроводових мереж зв'язку загального користування та приватних мереж зв'язку. Система *PACS* забезпечувала можливість передачі мови, низькошвидкісну передачу даних, а також цифрових даних у рамках інтелектуальної мережі, автентифікацію абонентських станцій, реєстрацію терміналів мережі, шифрування повідомлень в радіоінтерфейсі.

Система безпроводового персонального зв'язку **PHS** (*Personal Handphone System*) була розроблена в Японії. За своїми можливостями вона багато в чому схожа із системою *DECT*. У системі *PHS*, так як і в системі *DECT*, використовується динамічний розподіл каналів, не потрібне планування частот і допускається розгортання декількох мереж на суміжних територіях, підтримуються функції *ISDN*. Рівень організації безпеки передачі повідомлень у системах *PHS* близький до *DECT*.

ВИСНОВКИ:

- безпроводова система радіотелефонного зв'язку (бездротова телефонія) – це мобільна система радіозв'язку з обмеженою рухливістю абонентів, причому обмеження відносяться як до дальності переміщення абонентів від базової станції (десятки–сотні метрів), так і до швидкості переміщення (швидкість пішохода – до 5...10 км/год);
- це самостійна галузь мобільного радіозв'язку, яка характеризується специфічними особливостями у порівнянні з іншими видами мобільного зв'язку;
- ці засоби зв'язку розраховані, у першу чергу, на застосування усередині приміщень, при малих відстанях зв'язку і, отже, з малою затримкою та малою різницею ходу сигналів при багатопроменевому поширенні радіохвиль;
- невелика потужність випромінювання передавачів, зазвичай *не більше 10 мВт*, і, відповідно, ощадлива витрата енергії джерел живлення абонентських станцій;
- порівняно проста обробка сигналу при високій якості передачі мови, що не поступає якості проводової телефонії;
- динамічний розподіл каналів, що дозволяє дуже раціонально використовувати наявний частотний ресурс;
- дуплексний зв'язок із частотним або частотно–часовим розподілом каналів множинного доступу;
- не завжди передбачається повне покриття території, як це завжди має місце в стільникових і транкінгових системах.

Системи на базі технологій і стандартів стільникового зв'язку

Дана категорія систем характеризується досить високою ємністю стільників і великою дальністю зв'язку між БС і терміналами абонентів. Так, наприклад, радіус стільника БС в аналоговій системі *RAS 1000* (фірми *Ericsson*), що підтримує стандарти *NMT-450* і *NMT-900*, досягає 46 км при роботі в смузі частот 415...450 МГц. Максимальні радіуси стільників цифрових систем менші і складають 20...35 км. Системи на базі технологій і стандартів стільникового зв'язку добре підходять для телефонізації великих територій з різними рівнями щільності абонентів. Однак будучи вузькосмуговими, за якістю передачі мови і швидкістю передачі даних, вони уступають широкосмуговим фірмовим системам. Крім того, ряд систем мають засоби, що забезпечують рухливість зв'язку і, що є надлишковими при обслуговуванні стаціонарних абонентів.

23.3. Особливості широкосмугових безпроводових абонентських систем

При вирішенні задачі «останньої милі» з метою заміни кабельних структур для забезпечення передачі високошвидкісного потоку даних (наприклад, телебачення, відеоконференції, потокове відео, доступ до

мережі Інтернет тощо) отримали розвиток широкосмуговий безпроводовий радіодоступ **BWA**. Для цього був задіяний діапазон частот вище 2 ГГц.

Базові станції таких розподільчих мереж включають наступне обладнання: відповідні інтерфейси, зовнішнє радіообладнання, мультиплексорне обладнання, базові блоки, один або декілька шлюзів. Для моніторингу системи використовують обладнання технічного обслуговування.

Абонентське обладнання представлено термінальними та універсальними абонентськими станціями. Останні передбачають передачу мови і даних.

Для організації зв'язку використовуються частоти діапазонів сантиметрових і міліметрових хвиль, які дозволені відповідними національними радіочастотними органами. Наприклад, в США Федеральна комісія по засобах зв'язку виділила для комерційних стаціонарних безпроводових послуг 15 смуг частот, що знаходяться в діапазоні 2...40 ГГц.

Розрізняють наступні різновиди широкосмугових систем:

- *MMDS - Multichannel Multipoint Distribution Service* (багатоканальна багатоточкова розподільча служба);

- *LMDS - Local Multipoint Distribution Service* (локальна багатоточкова розподільча служба).

Системи *MMDS* працюють в більш низькому діапазоні частот ніж *LMDS* і відповідно при однаковій потужності обслуговують більші за площею території, але при цьому забезпечують більш низьку швидкість доступу. Крім того, обидві системи потребують наявності прямої видимості між антенами радіообладнання базової і абонентської станцій. Системи функціонують в наступних мережевих структурах:

- «точка – багато точок» (*point-to-multipoint*) – для організації прямого каналу;

- «точка – точка» (*point-to-point*) - для організації зворотного каналу.

Системи *MMDS* та *LMDS* **не стандартизовані**.

Служба MMDS

MMDS (рис. 23.2) використовуються для однонаправленої передачі сигналів телебачення, радіомовлення та даних в діапазоні частот 2,5...2,686 ГГц (можливо до 10 ГГц). В *MMDS* зворотний канал не передбачається. Проте, систему можна добудувати до двонаправленої. Сигнал зворотного каналу може бути розміщений в смугах частот 2,15...2,16 ГГц, 2,30...2,35 ГГц, або всередині самого діапазону *MMDS* (2,5...2,686 ГГц). В першому випадку потрібне отримання окремих дозвільних документів на додатковий частотний діапазон, у другому - значно скорочується можлива кількість транслюємих телевізійних каналів.

Потужність, яка випромінюється (декілька Ватт), дозволяє базовій станції **MMDS** обслуговувати зону радіусом до 50 км. При цьому використовується звичайна амплітудна модуляція, як і в аналоговому ефірному телебаченні. Систему **MMDS** можна використовувати для підтримки двосторонніх послуг, у тому числі - для доступу до **Internet**.

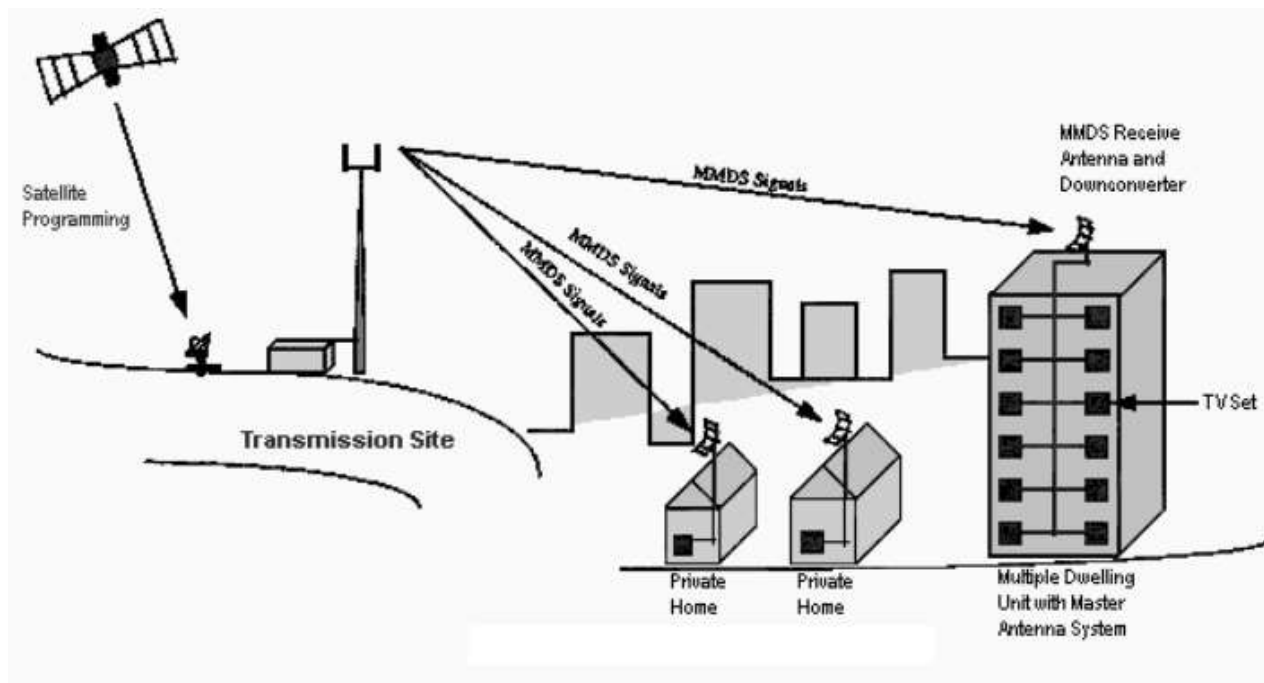


Рис. 23.2. Типова структура системи **MMDS**.

Системи **MMDS** знайшли широке розповсюдження в США для доставки телевізійних програм.

Переваги систем **MMDS** (у порівнянні з **LMDS**):

- сигнал з однаковою потужністю може розповсюджуватися на більш великі відстані;
- устаткування для роботи на більш низьких частотах є дешевшим;
- сигнали **MMDS** не так схильні до поглинання опадами (дощем, снігом).

Недоліки систем **MMDS**:

- оскільки вони працюють на більш низьких частотах (2...3 ГГц), то використовують меншу робочу ширину смуги частот, тобто забезпечують меншу швидкість передачі;
- невелика кількість транслюємих телевізійних каналів (до 24 каналів в стандарті **SECAM** і до 31 в стандарті **PAL**);
- необхідно державне ліцензування діапазону частот.

В Україні прикладом системи **MMDS** були системи МІТРІС (Мікрохвильова Інтегрована ТелеРадіоІнформаційна Система) та ТРС «Трофі», які призначені для надання послуг абонентського телебачення, мовлення, передачі даних, багатоканальної телефонії, мультимедіа тощо. Системи працюють у супутниковому діапазоні *Ku* від 11,7 до 12,5 ГГц. Для зворотного каналу можуть бути задіяні діапазони 2,3 або

2,4 ГГц. Ширина смуги одного частотного каналу становить 28 МГц. На базовій станції використовують до 8 секторних антен (45°). Радіус зони покриття базового варіанту становить близько 20 км.

Служба LMDS

LMDS – тип радіотехнології з доставки телевізійних сигналів і забезпечення двостороннього широкосмугового зв'язку в діапазоні частот понад 20 ГГц. В США для систем **LMDS** виділяються частоти близько 30 ГГц, в Європі - близько 40 ГГц. Рознесення каналів складає 20 МГц. В Україні для систем мультисервісного радіодоступу виділена смуга частот від 27,5 ГГц до 29,5 ГГц.

Радіотехнологія **LMDS** по суті являє собою стільникову систему передачі інформації для фіксованих абонентів із використанням радіоканалу в діапазоні НВЧ. Загальна структура мережі передбачає розгортання системи стільників, у центрі яких установлюються базові станції (рис. 23.3). Радіус дії однієї базової станції становить кілька кілометрів (до 7 км). Швидкість передавання даних у діапазонах 26 ГГц, 28 ГГц, 38 ГГц може досягати до 45 Мбіт/с. Використовуються секторні антени з кутом покриття 60° ... 90° .

Переваги LMDS:

- відносно висока швидкість передачі;
- можливість передачі відеосигналів, телефонного зв'язку та обміну даними;
- відносно низька вартість у порівнянні з альтернативними кабельними послугами.

Недоліки систем LMDS:

- малий радіус обслуговування для однієї базової станції (практично 2...4 км);
- сигнал цього діапазону не може огинати будівлі, перешкоди, дерева з густим листям тощо.

Для поліпшення якості послуг і збільшення зон покриття використовують базові станції із зонами обслуговування, що перекриваються, ретранслятори та відбивачі.

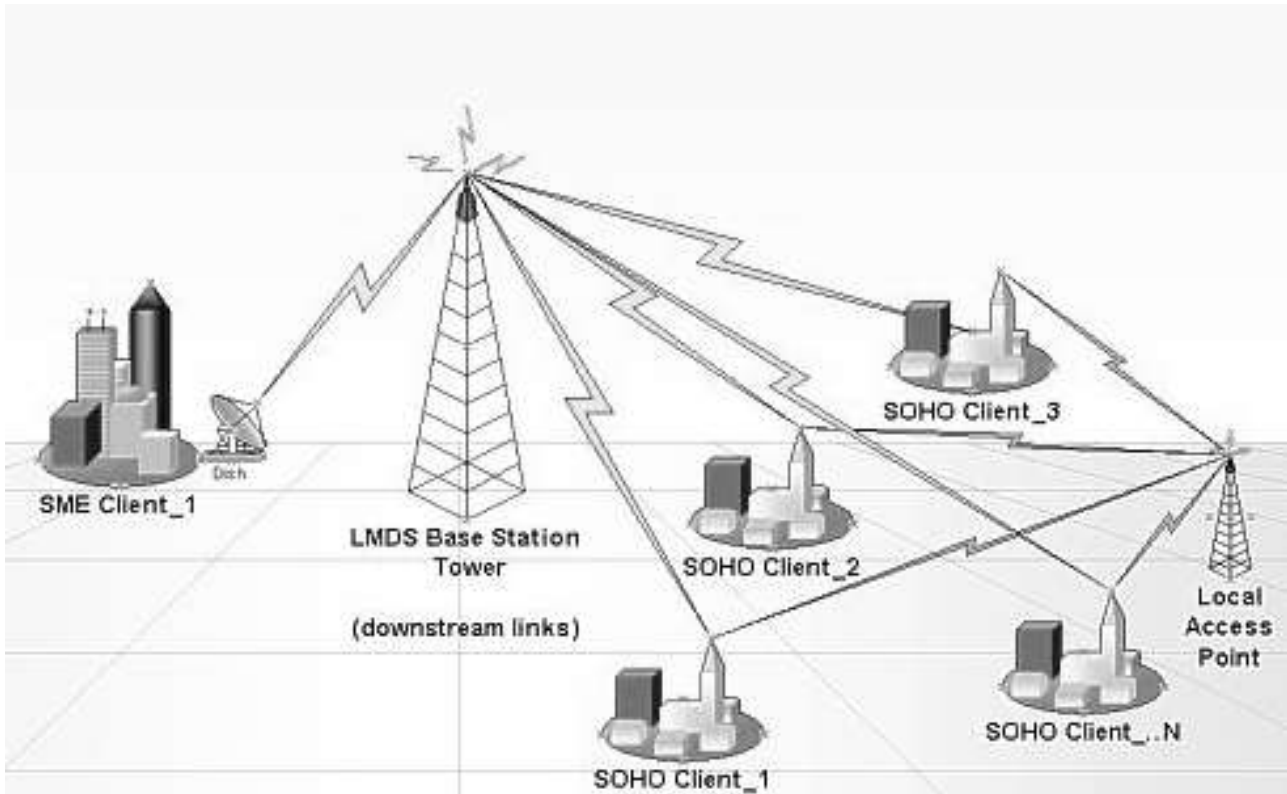


Рис. 23.3. Варіант архітектури мережі *LMDS*.

24. Технології безпроводових мереж передачі даних

24.1. Особливості та класифікація безпроводових мереж

У зв'язку із зростанням кількості засобів обчислювальної техніки, появи необхідності організації високошвидкісних з'єднань між ними із урахуванням їх можливої мобільності, стали розроблятися безпроводові рішення (*Radio Ethernet*), як альтернатива проводовим мережам передачі даних.

У користувачів мобільних пристроїв із безпроводовим доступом з'явилася можливість переміщатися в межах зони діючих мереж. Швидкість сучасних безпроводових технологій досить висока, що дозволяє використовувати їх для вирішення дуже широкого спектру практичних задач. Крім того, розгортання безпроводових мереж потребує значно меншого часу та матеріальних витрат.

Слід відмітити і деякі недоліки безпроводових мереж:

- схильність до впливу радіозавад;
- обмежений радіус дії;
- менша швидкість передачі даних ніж у проводових мережах;
- складніша схема забезпечення конфіденційності та безпеки інформації, що передається;
- наявність експлуатаційних та частотних обмежень в різних країнах;
- можлива неповна сумісність між пристроями різних виробників.

Зазвичай технології безпроводових мереж групуються у чотири типи, що розрізняються за розміром зони дії мережі (рис. 24.1).

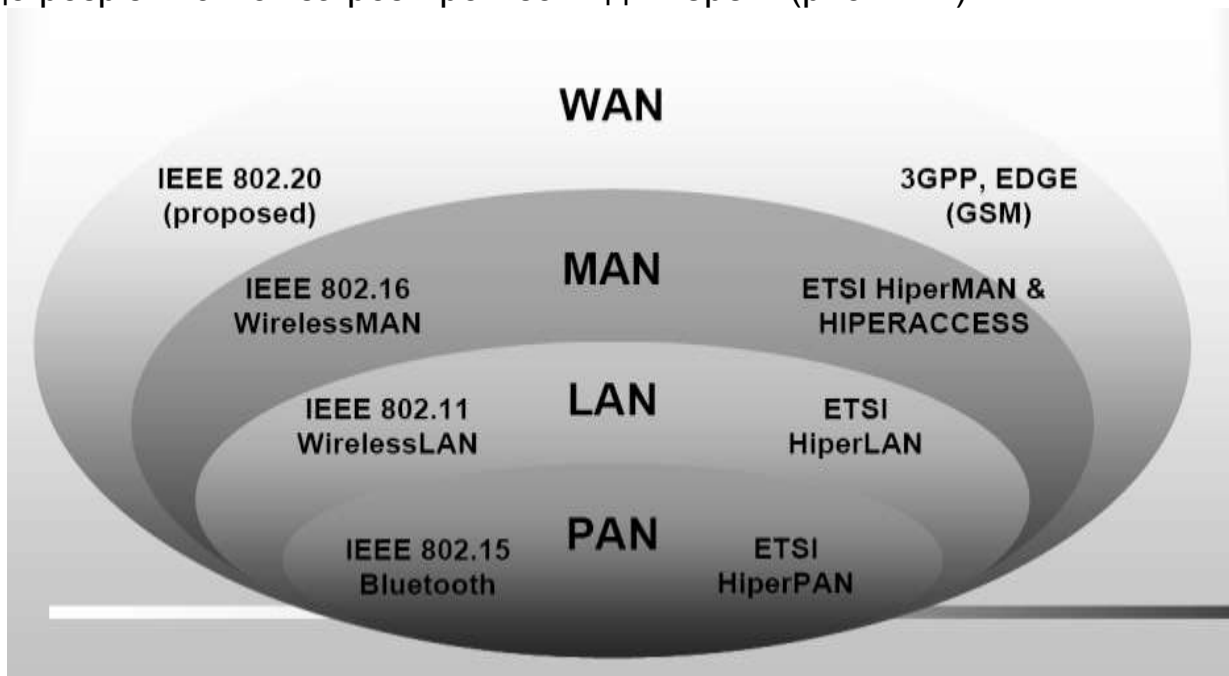


Рис. 24.1. Класифікація безпроводових мереж передачі даних.

PAN (*Personal Area Network*) – безпроводові **персональні мережі**, які призначені для безпроводового об'єднання електронних пристроїв

користувача (ПК, КПК, мобільних телефонів, принтерів, телефонної гарнітури та інших пристроїв) в радіусі до 10 метрів.

WLAN (*Wireless Local Area Network*) - **безпроводові локальні мережі**, які виступають альтернативою проводових мереж та реалізують безпроводовий доступ до групових ресурсів в межах зони дії до 100 метрів. Такі мережі інколи використовуються для продовження проводових корпоративних локальних мереж. У невеликих компаніях WLAN можуть повністю замінити кабельні з'єднання.

WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) – **міські (регіональні) безпроводові мережі**, які мають радіус дії до 50 км.

WWAN (*Wireless Wide Area Network*) – **глобальні безпроводові мережі**, які забезпечують доступ мобільних користувачів до їх корпоративних мереж і Інтернету. Для передачі даних використовують стільникові мережі.

Основними елементами безпроводових мереж є **точки доступу**, які можуть виконувати і функції комутатора, та **безпроводові абонентські адаптери** (радіомодеми). Точки доступу забезпечують взаємодію та обмін даними з безпроводовими адаптерами, а також зв'язок з проводовим сегментом мережі. Для передачі даних використовують різні види сигналів, а саме – інфрачервоне випромінювання (з довжиною хвилі $\lambda=800\dots900$ нм), широкосмугові сигнали (*FHSS*, *DSSS*), вузькосмугові сигнали стандартів стільникового зв'язку тощо. При цьому для радіодоступу застосовують як не ліцензовані практично в глобальному масштабі діапазони частот (діапазон **ISM** - *Industrial, Scientific and Medical*: 2,4...2,4835 ГГц; діапазон **U-NII** - *Unlicensed National Information Infrastructure*: 5,15...5,35 ГГц та сумісний *U-NII/ISM*: 5,725...5,875 ГГц) так і діапазони частот, використання яких потребує ліцензії.

24.2. Технології безпроводових локальних мереж *Wi-Fi*. Сімейство стандартів *IEEE 802.11x*

Wi-Fi (англ. *Wireless Fidelity* – «безпроводова точність») – торгова марка *Wi-Fi Alliance* для безпроводових мереж на базі стандарту *IEEE 802.11*.



Комітет по стандартам *IEEE 802* Міжнародного інституту інженерів з електротехніки та радіоелектроніки у 1990 році сформував робочу групу по стандартам для безпроводових локальних мереж *IEEE 802.11*.

Метою групи була розробка архітектури безпроводових мереж *WLAN* і специфікацій каналного і фізичного рівнів для забезпечення швидкості передачі даних 1 та 2 Мбіт/с в радіоканалі частотного діапазону 2,4 ГГц (в подальшому – 3,6 ГГц та 5 ГГц).

Початковий стандарт *IEEE 802.11* був прийнятий в 1997 році. В стандарті на фізичному рівні були визначені наступні технології: методи

розширення спектру (*FHSS*, *DSSS*) та випромінювання в інфрачервоному діапазоні (*IR*).

Для передачі широкосмугових сигналів з технологією *DSSS* було передбачено використання *ISM* діапазону 2,4 ГГц із смугою частот 83 МГц від 2,400 ГГц до 2,483 ГГц, який поділений на 13 каналів та додатковий 14-й канал (рис.24.2). В більшості країн дозволено до використання 13 каналів, 11 – в США та Канаді, 14 – тільки в Японії. Наприклад, перший канал працює в смузі 2,401...2,423 ГГц, тобто $2,412 \text{ ГГц} \pm 11 \text{ МГц}$. Рознесення між центральними частотами сусідніх каналів в цьому діапазоні складає 5 МГц.

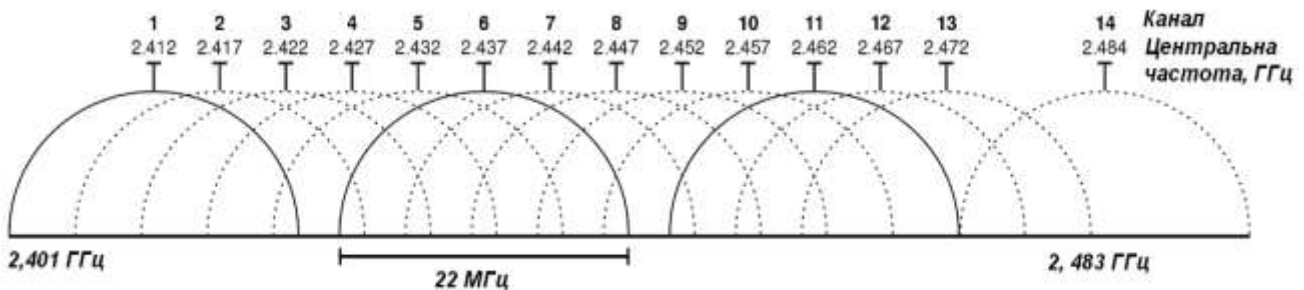


Рис. 24.2. Частотні канали в діапазоні 2,4 ГГц

Для виключення взаємних завад між каналами необхідно, щоб їхні смуги не перекривалися, тобто мали рознесення 25 МГц. Тобто в одній зоні одночасно можуть використовуватися тільки три канали, які не перекриваються. Наприклад, канали з номерами 1, 6, 11, або 2, 7, 12, або 3, 8, 13 (рис.24.3.). При цьому міжканальний інтервал між цими каналами складає 3 МГц. Виконати такі умови на практиці достатньо складно. От чому в безпроводових локальних мережах для боротьби з завадами використовується кодування з високою надмірністю. Якщо кодування не дозволяє забезпечити задану достовірність передачі, швидкість з максимального значення послідовно знижується до одного з наступних фіксованих значень. Зниження швидкості відбувається не тільки при високому рівні завад, але і при збільшенні відстані між елементами безпроводової мережі.

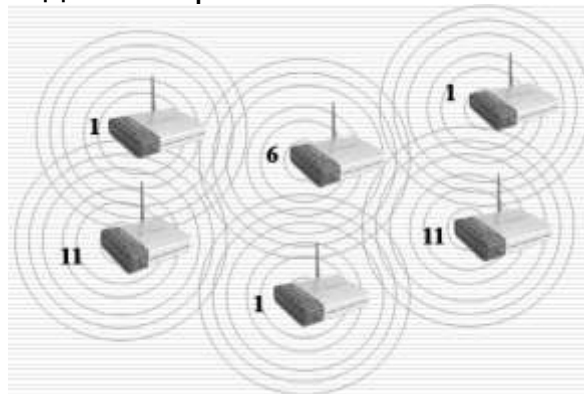


Рис.24.3. Варіант схеми використання частотних каналів

Розширення спектру за технологією *DSSS* передбачало застосування послідовності Баркера довжиною 11 біт ($B1=10110111000$). Кожна інформаційна «1» заміщала на $B1$, а «0» - на інверсію $B1$.

Для технології *FHSS* було визначено 79 каналів зі смугою 1 МГц. Частота переключання частот повинна бути не менше ніж 2,5 рази в секунду як мінімум між 6 каналами. Для зменшення числа колізій між зонами покриття, що перекриваються, було запропоновано 3 набори номерів частот довжиною 26 значень (табл. 24.1).

Табл. 24.1

Набір	Схеми стрибкоподібного переключення частот
1	0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63, 66, 69, 72, 75
2	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46, 49, 52, 55, 58, 61, 64, 67, 70, 73, 76
3	2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 56, 59, 62, 65, 68, 71, 74, 77

Безпроводова мережа містить наступні елементи:

- *абонентські пристрої з безпроводовими адаптерами* – це звичайні ПК (планшети, смартфони тощо) з безпроводовою мережною інтерфейсною картою (адаптером) (рис. 24.4);
- *точки доступу (Access Point)* – обслуговують користувачів в комерції та містять у своєму складі прийомопередавач, інтерфейс проводової мережі (*IEEE 802.3*) та відповідне програмне забезпечення (рис. 24.5);



Рис. 24.4. Приклади безпроводових адаптерів



Рис. 24.5. Точки доступу

Сумісність обладнання різних виробників гарантується незалежною міжнародною організацією *Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA)*, членами якої є більше ніж 80 компаній, в тому числі такі як, *Cisco, Lucent, 3Com, IBM, Intel, Apple, Siemens, Sony, Compaq, Dell, Fujitsu, AMD*.

В Україні використання обладнання *Wi-Fi* без дозволу Українського державного центру радіочастот можливе лише в разі застосування точки доступу із стандартною антеною з круговою діаграмою спрямованості з коефіцієнтом підсилення <6 дБі, потужністю сигналу ≤ 100 мВт в діапазоні 2,4 ГГц і ≤ 200 мВт в діапазоні 5 ГГц всередині приміщень (Рішення Національної комісії з регулювання зв'язку України № 914 від 2007.09.06). В разі використання обладнання з сигналом більшої потужності або надання послуг доступу в Інтернет та інших ресурсів, необхідно реєструвати передавач і отримати ліцензію УДЦР.

Стандарт визначає два режими роботи безпроводової мережі:

- «*Ad-hoc*» - (режим «точка-точка» або «кожний з кожним») – передбачає, що зв'язок між станціями (клієнтами) здійснюється безпосередньо (без використання точки доступу) (рис. 24.6);
- «*Infrastructure*» - (режим інфраструктури або «клієнт – сервер») - передбачає наявність точки доступу і абонентських станцій (рис.24.7).

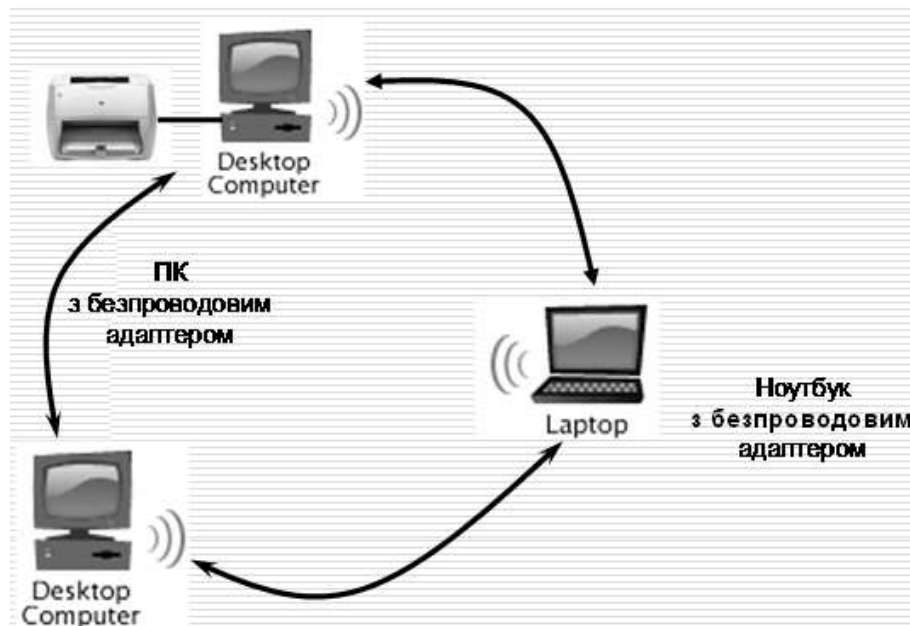


Рис. 24.6. Режим *Ad-hoc*

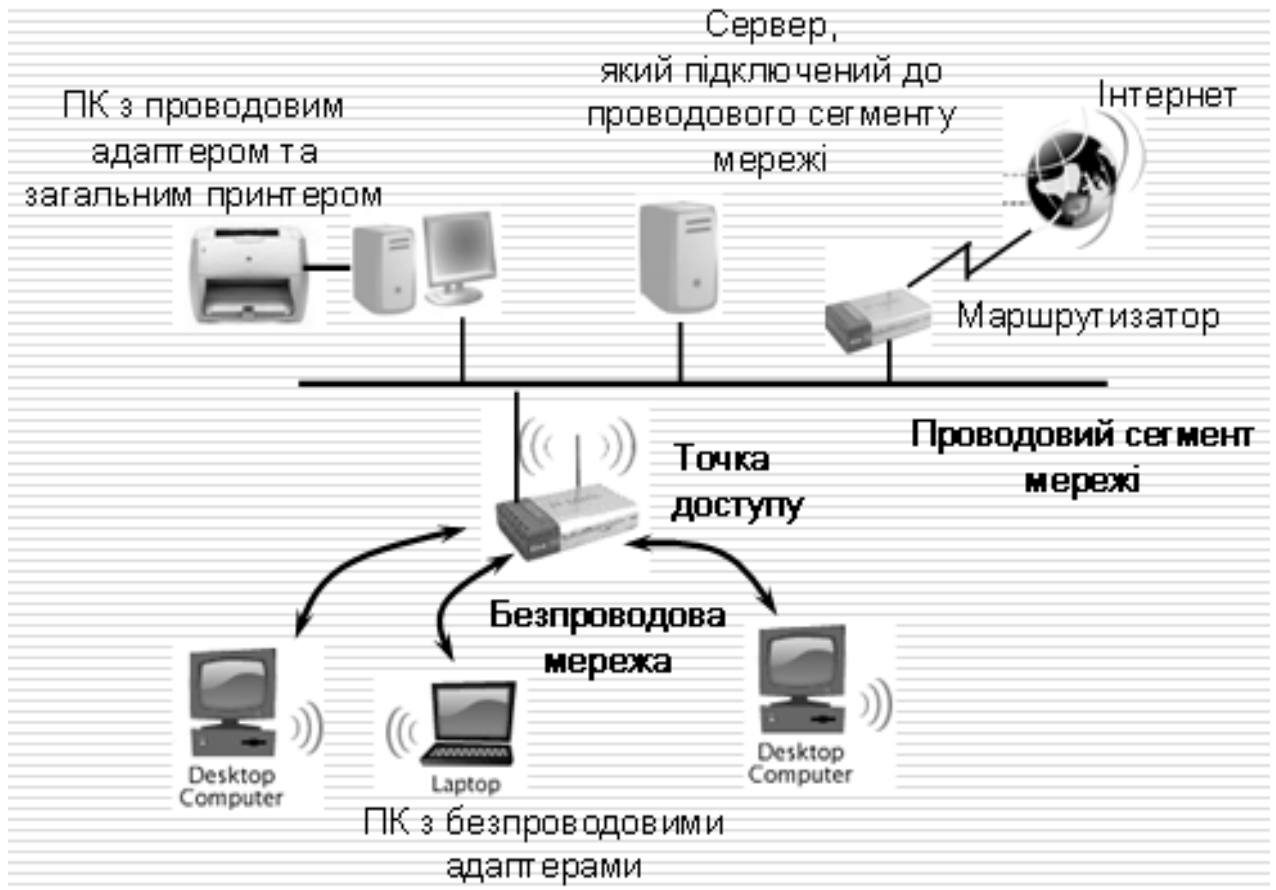


Рис. 24.7. Режим інфраструктури (варіант)

Безпроводові точки доступу можуть працювати в наступних режимах:

- *Точка доступу (AP – Access Point);*
- *Безпроводовий клієнт (AP Client)* - точка доступу виконує функцію безпроводового адаптера та дозволяє підключити тільки **одну** MAC-адресу;
- *Мостовий режим (WDS - Wireless Distribution System – розподілена безпроводова система)* - призначений для об'єднання двох і більше проводових локальних мереж, при цьому підключення безпроводових клієнтів до точки доступу, що працює в режимі моста неможливо (рис.24.8);
- *Мостовий режим з точкою доступу (WDS with AP)* - призначений для об'єднання двох і більше безпроводових локальних мереж, при цьому передбачено підключення безпроводових і проводових клієнтів до цієї точки доступу (рис.24.9).
- *Безпроводовий повторювач (AP Repeater)* - точка доступу забезпечує збільшення радіусу дії іншої точки доступу, що працює в інфраструктурному режимі (цей режим є опціональним і підтримується не всім безпроводовим обладнанням).

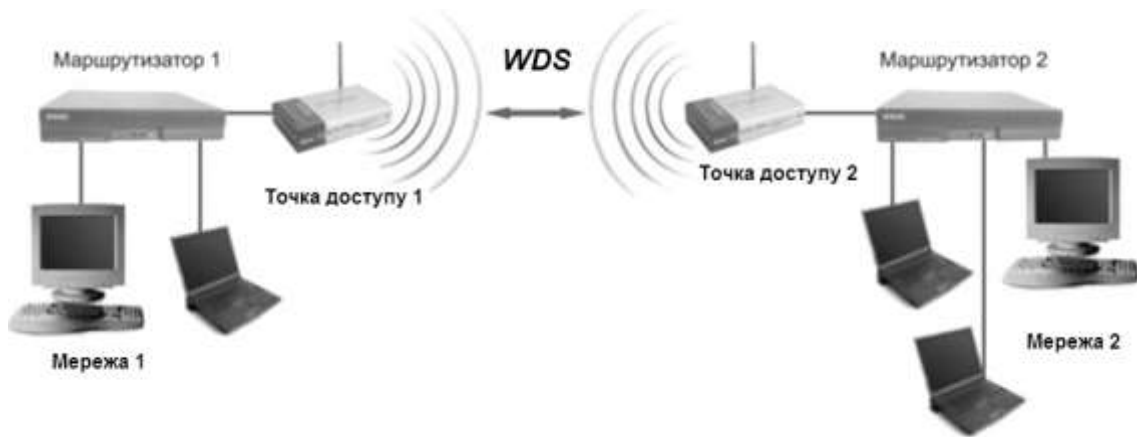


Рис.24.8. Мостовий режим

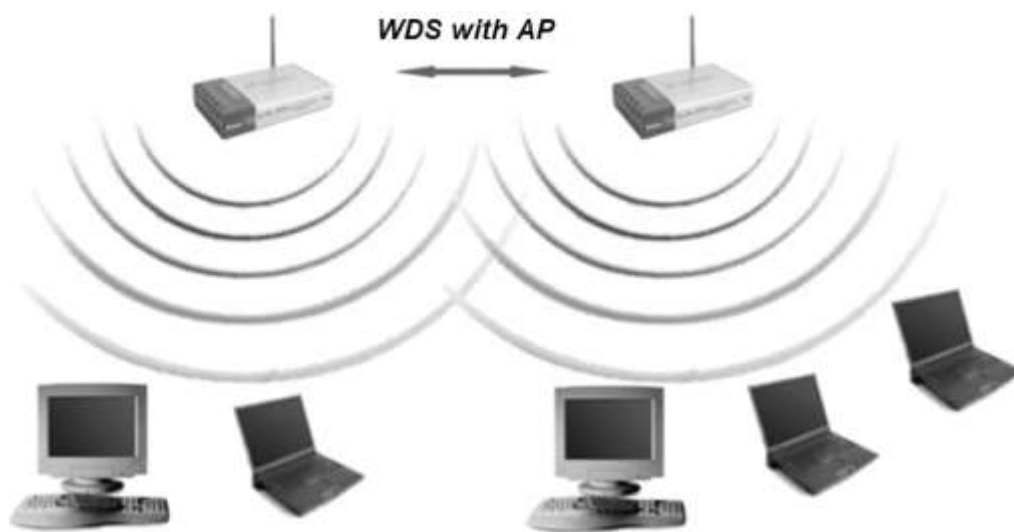


Рис.24.9. Мостовий режим з точкою доступу

Канальний рівень 802.11 передбачає управління логічним зв'язком (*Logical Link Control – LLC*) та управління доступом до носія (*Media Access Control – MAC*). Використовується *LLC* і 48-бітова адресація аналогічна іншим мережам стандарту *IEEE 802*. Так як елементи безпроводової мережі працюють у **напівдуплексному режимі**, то *MAC* рівень передбачає реалізацію **CSMA/CA** (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) - методу множинного доступу з контролем несучої і уникненням *колізій*, що являють собою намагання декількох абонентських станцій одночасно здійснити передачу в мережі.

Це працює наступним чином. В мережах 802.11 діє принцип «*слухати, перш ніж віщати*». Елемент мережі, що бажає почати передачу, спочатку вимірює рівень потужності прийнятого сигналу в каналі. Якщо потужність вище порогового значення - канал вважається зайнятим, а передача даних *АС* затримується у відповідності з правилами протоколу. Коли потужність менша порогового значення - канал вважається вільним, цей елемент передає сигнал *RTS* («запит на передачу»), а отримавши від ТД сигнал *CTS* здійснює передачу даних. Решту елементів даної мережі сигнал *CTS* примушує відкласти свої передачі. Це унеможлиблює колізію. Причому, саме застосування

RTS/CTS дозволяє ще і вирішити проблему «прихованої точки», коли дві АС приймають сигнали з ТД, але із-за перешкод, або великої відстані не можуть «чути» один одного.

Стандарт передбачає захист інформації в безпроводовій мережі за допомогою протоколу **WEP** (*Wired Equivalent Privacy*), який включає механізми автентифікації і шифрування.

Розвиток стандарту 802.11 в діапазоні частот 2,4...2,4835 ГГц відбувався у напрямку підвищення швидкості передачі інформації за рахунок застосування нових, більш ефективних, способів модуляції та схем кодування.

Стандарт *IEEE 802.11a*

Специфікація *IEEE 802.11a* використовує смугу частот 5 ГГц – діапазон **UNII** (*Unlicensed National Information Infrastructure*) та механізм мультиплексування з ортогональним розділенням несучих частот *OFDM*. Технологія *OFDM* передбачає паралельну передачу корисного сигналу дочасно по декількох частотних каналах, що збільшує пропускну здатність каналу. Використовуються 52 піднесучі частоти: 4 – для передачі пілот-сигналів, 48 – для передачі інформації. Смуга частот на одну піднесучу складає 0,3125 МГц = 20 МГц/64. Для модуляції несучих частот застосовують *BPSK*, *QPSK*, а також 16- та 64-позиційні квадратурні амплітудні модуляції (*QAM*).

В сукупності з різними швидкостями кодування забезпечується передача даних з базовими значеннями: 6, 9, 12, 18, 24, 36 або 54 Мбіт/с (табл. 24.2).

Табл. 24.2

Швидкість передачі даних, Мбіт/с	6	9	12	18	24	36	48	54
Модуляція	<i>BPSK</i>	<i>BPSK</i>	<i>QPSK</i>	<i>QPSK</i>	16-QAM	16-QAM	64-QAM	64-QAM
Швидкість згортаючого кодування	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4

Смуга частот (табл. 24.3) діапазону **UNII** відноситься до категорії частот, що не потребують ліцензування в США та країнах, які прийняли правила використання спектра типу *FCC* на безліцензійній основі.

Табл. 24.3

Діапазон	UNII-1	UNII-2	UNII-2 Extended	UNII-3
Смуга частот, ГГц	5,15 ... 5,25	5,25 ... 5,35	5,470...5,725	5,725...5,825
К-ть каналів	4	4	11	4

Нумерація каналів починається з частоти 5,0 ГГц із кроком 5,0 МГц. Для стандарту *IEEE 802.11a* смуга частот 5,15 ...5,35 ГГц поділена на 8 каналів, які не перекриваються (див. рис.24.10). Крок між несучими частотами каналів в цьому діапазоні складає 20 МГц, несуча частота першого каналу складає 5,180 ГГц. Смуга частот 5,725...5,825 ГГц поділена на 4 канали, які не перекриваються, несуча частота першого каналу цього діапазону складає 5,745 ГГц, рознесення між несучими – 20 МГц. Ширина смуги частот одного каналу на рівні мінус 20 дБ становить 22 МГц, а на рівні мінус 28 дБ – 40 МГц.

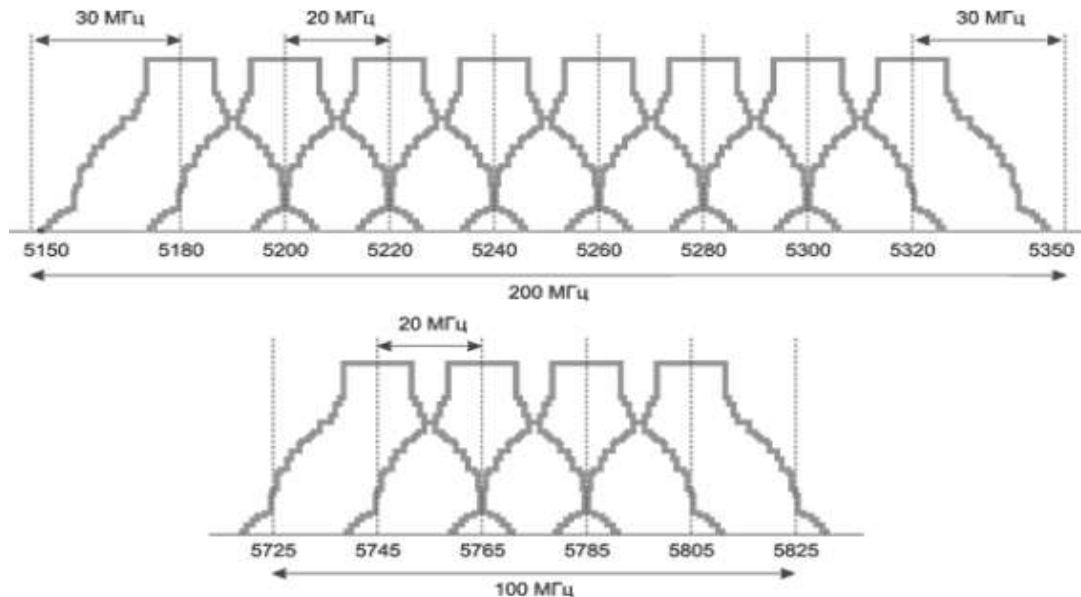


Рис. 24.10. Розподіл діапазону UNII на 12 частотних каналів

Максимальна вихідна потужність передавача для різних піддіапазонів стандарту *IEEE 802.11a* складає:

- 40 мВт - в діапазоні **UNII-1**;
- 200 мВт - в діапазоні **UNII-2**;
- 800 мВт - в діапазоні **UNII-3**.

Чутливість приймальних пристроїв залежить від швидкості передачі (для пристроїв стандарту *802.11a* знаходиться в межах від -82 дБм до -65 дБм).

Стандарт *IEEE 802.11b*

Як і базовий стандарт специфікація ***IEEE 802.11b*** працює в діапазоні частот 2,4 ГГц, застосовує технологію *DSSS* із використанням 8-разрядних функцій Уолша та диференційну 2- або 4-позиційні фазові модуляції (*DBPSK* або *DQPSK*) відповідно для швидкостей передачі 1 та 2 Мбіт/с. Додатково стандарт передбачає швидкості передачі 5,5 та 11 Мбіт/с при використанні компліментарного кодування *CCK* (*Complementary Code Keying*). Застосування пакетного бінарного згортаючого кодування *PBCC* (*Packet Binary Convolutional Coding*) дозволяє збільшити швидкість передачі до 22 Мбіт/с (специфікація *IEEE 802.11b+*).

Стандарт *IEEE 802.11g*

Стандарт *IEEE 802.11g* представляє собою перенесення схеми модуляції *OFDM* із діапазону 5 ГГц (*IEEE 802.11a*) в діапазон 2,4 ГГц. Одною з вимог до специфікації була зворотна сумісність із *IEEE 802.11b*. Для цього розробники передбачили застосування технології *CCK* для швидкостей до 11 Мбіт/с та *OFDM* для більш високих швидкостей (табл.24.4).

Табл. 24.4

Швидкість, Мбіт/с	Тип модуляції	
	Обов'язково	Допустимо
1	послідовність Баркера	
2	послідовність Баркера	
5,5	<i>CCK</i>	<i>PBCC</i>
6	<i>OFDM</i>	<i>OFDM</i>
9		<i>OFDM, CCK-OFDM</i>
11	<i>CCK</i>	<i>PBCC</i>
12	<i>OFDM</i>	<i>CCK-OFDM</i>
18		<i>OFDM, CCK-OFDM</i>
22		<i>PBCC</i>
24	<i>OFDM</i>	<i>CCK-OFDM</i>
33		<i>PBCC</i>
36		<i>OFDM, CCK</i>
48		<i>OFDM, CCK</i>
54		<i>OFDM, CCK</i>

Компанія *Atheros*, виробник чипів для безпроводових мереж, ще в квітні 2003 року оголосила про розробку технології ***Super G*** для підвищення швидкості передачі мереж 802.11g до 108 Мбіт/с. Збільшити пропускну спроможність устаткування вдалося завдяки застосування декількох технологій:

- *пакетної передачі даних (Frame Bursting)* - ця технологія дозволяє передавати декілька пакетів даних без паузи, яка звичайно присутня між пакетами. Іншими словами, більше пакетів даних передаються один за одним, не очікуючи можливості факту передачі іншими станціями.

- *технології «швидких кадрів»* - допомагає інтегрувати декілька пакетів даних в один кадр, і замість того, щоб обмежувати розмір пакету даних, передаюча і приймаюча станції можуть "домовлятися" про розмір пакетів даних, підвищуючи таким чином свою ефективність.

- *апаратного ущільнення* - дві станції, підтримуючі апаратне ущільнення даних «на льоту», застосовують компресію до кожного кадру даних.

- *технології **Dynamic Turbo*** - автоматично об'єднується два частотні канали даних в один, підвищуючи в два рази пропускну спроможність мережі (*Dynamic Turbo* робить цю маніпуляцію тільки у разі збільшення навантаження на мережу повністю автоматично без участі користувача).

Навіть без об'єднання двох каналів в один, вдається майже в два рази підвищити пропускну спроможність за рахунок компресії, об'єднання пакетів і видалення паузи між їх трансляціями. Використовуючи два канали замість одного, вдається не тільки підвищити швидкість передачі в мережі, але і збільшити дальність її дії. Тобто, на відстані, де звичайна мережа *IEEE 802.11g* працює на швидкості 18 Мбіт/с, мережа *Super G* працюватиме на швидкості 36 Мбіт/с. Але, потрібно враховувати те, що точка доступу *Super G* може працювати в режимі *Dynamic Turbo* тільки з клієнтом, обладнання якого підтримує *Super G*.

Стандарт *IEEE 802.11n*

Цей стандарт був затверджений 11 вересня 2009 року. Використовуються діапазони частот 2,4 ГГц або 5 ГГц для забезпечення сумісності із обладнанням специфікацій *IEEE 802.11a/b/g*.

Збільшення швидкості передачі досягається завдяки:

- подвоєння ширини смуги частот каналу (збільшення з 20 МГц до 40 МГц);
- застосування технології просторового мультиплексування **MIMO**;
- застосування **SGI** (*Short Guard Interval*) - зменшення у 2 рази довжини захисного інтервалу між символами *OFDM* до $GI=400$ нс;
- збільшення швидкості згортаючого кодування до 5/6.

Специфікація *802.11n* передбачає використання як стандартних каналів шириною 20 МГц, так і каналів 40 МГц з більш високою пропускну здатністю.

Ключова технологія стандарту *802.11n* під назвою **MIMO** (*Multiple Input, Multiple Output* - множинний вхід, множинний вихід) передбачає застосування просторового мультиплексування з метою одночасної передачі декількох інформаційних потоків по одному частотному каналу. Це забезпечується використанням декількох антен на приймальній і передавальній частинах безпроводового обладнання. Приклад системи **MIMO**, яка складається з n передавальних і m приймальних антен зображена на рис. 24.11. Використовуються схеми від 1x1 до 4x4.

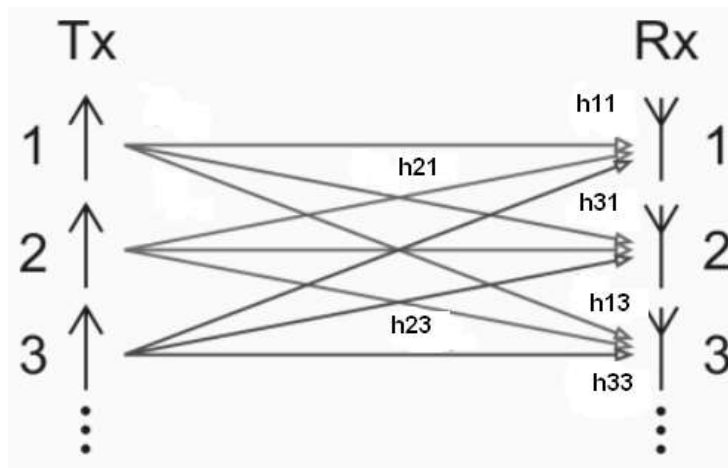


Рис.24.11. Принцип реалізації технології **MIMO**

Передавач в такій системі посилає n незалежних сигналів, використовуючи n антен. На приймальній стороні кожна з m антен отримує сигнали, які є суперпозицією n сигналів від усіх антен передавача. Таким чином, сигнал R_1 , який приймає перша антена можливо представити в наступному вигляді:

$$R_1 = h_{11}T_1 + h_{21}T_2 + h_{31}T_3 + \dots + h_{m1}T_m$$

У матричному вигляді:

$$[R] = [h] \cdot [T],$$

де $[h]$ – матриця переносу, яка характеризує канал зв'язку *MIMO*.

Для того щоб приймач міг відновити приймаємий сигнал, повинні бути відомі коефіцієнти h_{ij} , які характеризують кожний із $n \times m$ канали передачі. Для визначення у приймачі коефіцієнтів h_{ij} в технології *MIMO* використовується преамбула пакета.

В технології *OFDM* для виключення можливості появи помилок внаслідок багатопроменевого розповсюдження передбачений захисний інтервал GI (*Guard Interval*) між символами. Стандартний $GI=800$ нс. Зменшення цього інтервалу до 400 нс (*SGI*) підвищує приблизно на 11 % швидкість передачі, але збільшує вірогідність появи помилок внаслідок інтерференції між символами.

В технології 802.11n максимальна швидкість згортаючого кодування збільшена до 5/6 (в технології 802.11a максимальна швидкість дорівнює 3/4), тобто кожні 5 вхідні біти в згортаючому кодері перетворюються у 6 вихідних бітів. Це збільшує загальну швидкість передачі даних, але погіршує властивість приймача виправляти помилки.

Залежність швидкості передачі від кількості антен, виду модуляції, швидкості згортаючого кодування і довжини захисних інтервалів GI для стандартного каналу шириною 20 МГц і каналу 40 МГц представлені в таблиці 24.5.

Табл. 24.5

Індекс модуляції та схеми кодування (<i>MCS</i>)	Кіл-ть каналів <i>MIMO</i>	Тип модуляції	Швидкість згортаючого кодування	Швидкість передачі даних, Мбіт/с			
				Смуга каналу 20 МГц		Смуга каналу 40 МГц	
				$GI=800$ нс	$GI=400$ нс	$GI=800$ нс	$GI=400$ нс
0	1	<i>BPSK</i>	1/2	6,5	7,2	13,5	15,0
1	1	<i>QPSK</i>	1/2	13,0	14,4	27,0	30,0
2	1	<i>QPSK</i>	3/4	19,5	21,7	40,5	45,0
3	1	16-QAM	1/2	26,0	28,9	54,0	60,0
4	1	16-QAM	3/4	39,0	43,4	81,0	90,0
5	1	64-QAM	2/3	52,0	57,8	108,0	120,0
6	1	64-QAM	3/4	58,5	65,0	121,5	135,0
7	1	64-QAM	5/6	65,0	72,2	135,0	150,0
...	2
15	2	64-QAM	5/6	130,0	144,4	270,0	300,0
...
31	4	64-QAM	5/6	260,0	288,9	540,0	600,0

Наприклад, для досягнення максимальної швидкості з'єднання 300 Мбіт/с необхідно, щоб і точка доступу і безпроводовий адаптер підтримували два просторових потоків (*MIMO*) і подвоєну ширину каналу 40 МГц.

Пристрої 802.11n передбачають три режими роботи:

- *успадкований (Legacy або Non-HT)*, в якому забезпечується підтримка пристроїв 802.11b/g або 802.11a;
- *змішаний (Mixed)*, в якому підтримуються пристрої 802.11 a/b/g і 802.11n;
- *«чистий» (HT - High Throughput або Greenfield)* - підтримуються тільки пристрої 802.11n (саме цей режим дозволяє реалізувати переваги підвищеної швидкості і збільшеної дальності передачі даних, які забезпечуються стандартом 802.11n).

Параметри фізичного рівня стандарту *IEEE 802.11x*

Табл. 24.6

Параметр	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n
Частотний діапазон, ГГц	2,4	5	2,4	2,4 або 5
Максимальна швидкість передачі даних, Мбіт/с	11	54	54	300 (теоретично 600)
Технології	<i>ССК</i>	<i>OFDM</i>	<i>OFDM</i>	<i>OFDM, ССК, MIMO</i>
Тип модуляції (для максимальної швидкості)	<i>QPSK</i>	<i>64-QAM</i>	<i>64-QAM</i>	<i>64-QAM</i>
Число каналів, які не перекриваються	3	12	3	15

Подальшим розвитком стандартів сімейства *IEEE 802.11x* є специфікація *IEEE 802.11ac*, яка має наступні особливості:

- діапазон частот – тільки 5 ГГц;
- ширина частотного каналу – до 160 МГц;
- кількість каналів *MIMO* – до 8;
- тип модуляції – до 256-QAM;
- максимальна швидкість передачі – 6 Гбіт/с;
- *MU-MIMO (Multi User MIMO)* - технологія одночасної комунікації більш ніж з одним користувачем;
- направлене випромінювання (*Beamforming*) – використання інтелектуальних антен;
- сумісність – з *IEEE 802.11n*;
- більші зони радіопокриття;
- досконалі механізми контролю активного і пасивного стану клієнтських пристроїв, що збільшує час автономної роботи мобільного обладнання.

Безпека WiFi мереж

Для того, щоб проникнути в безпроводову мережу, зловмиснику не потрібно фізично до неї підключатися, а якщо налагоджуванню мережі WiFi не було приділено належної уваги, то у нього теоретично виникає можливість:

- доступу до ресурсів користувачів Wi-Fi мережі, а через неї - і до ресурсів локальної мережі;
- підслуховування трафіку, отримання з нього конфіденційної інформації;
- спотворення інформації, що передається в мережі;
- крадіжки інтернет-трафіку;
- атаки на ПК користувачів і сервери мережі (наприклад, відмова в обслуговуванні або навіть повне глушіння радіозв'язку);
- впровадження підробленої точки доступу;
- розсилки спаму, протиправної діяльності від імені вашої мережі тощо.

При цьому можна виділити наступні дії зловмисника:

- підслуховування:
 - пасивне - збір інформації про мережу (хто використовує мережу, яка інформація циркулює, яке обладнання використовується тощо);
 - активне - підключення до мережі;
- «глушіння» базової станції (рис.24.12);
- «глушіння» користувача.



Рис.24.12. Атака «глушіння» БС.

Для забезпечення безпеки в локальних безпроводових мережах використовують наступні засоби:

- протоколи шифрування (*WEP, WPA, WPA2*);
- протоколи автентифікації (*802.1x, RADIUS, EAP*);
- віртуальні приватні мережі (*VPN*),
- відключення розсилки ідентифікатора мережі (*SSID*);
- контроль за підключенням до точки доступу на основі *MAC*-адресів;
- винесення безпроводової мережі за міжмережевий екран (рис.24.13);
- використання спеціального програмного забезпечення (наприклад, *AirDefense Guard, AirMagnet* тощо) тощо.

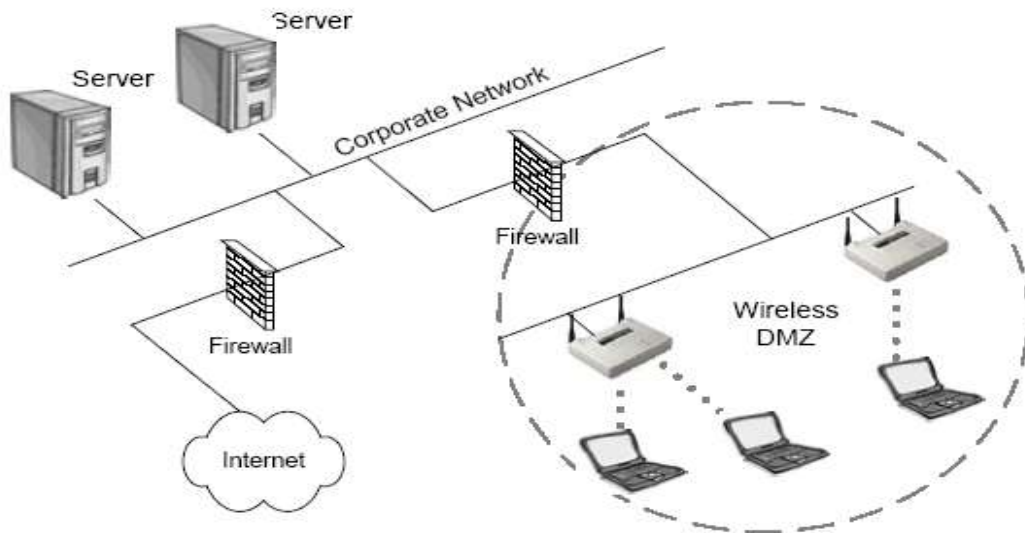


Рис.24.13. Варіант використання міжмережєвих екранів

Протокол **WEP** дозволяє шифрувати потік переданих даних на основі алгоритму *RC4* із ключем розміром 64 або 128 біт. Дані ключі мають так звану статичну складову довжиною від 40 до 104 біт і додаткову динамічну складову розміром 24 біта, яка має назву вектора ініціалізації (*IV - Initialization Vector*). Отриманий таким чином ключ і є вихідним ключем для генерації псевдовипадкового числа, який використовується для шифрування даних. Далі дані змішуються за допомогою логічної операції *XOR* із псевдовипадковою ключовою послідовністю, а вектор ініціалізації додається в службове поле кадру.

Але, як виявилось, зламати такий захист можна - відповідні утиліти присутні в Інтернеті (наприклад, *AirSnort*, *WEPCrack*). Основне слабе місце - це як раз вектор ініціалізації. Оскільки 24 біт забезпечують близько 16 млн. комбінацій (2^{24}), після чого ключ починає повторюватися. Для визначення цих повторів необхідно від 15 хв. до години (для ключа 40 біт), а після чого зловмисник може входити в мережу як звичайний зареєстрований користувач.

IEEE 802.1x базується на протоколі розширеної автентифікації *EAP* (*Extensible Authentication*), протоколі захисту транспортного рівня *TLS* (*Transport Layer Security*) і сервері доступу *RADIUS* (*Remote Access Dial-in User Server*), застосовується той же алгоритм, що і в *WEP*, а саме - *RC4*, але з деякими відмінностями. Всі ключі є 128-розрядними.

WPA (*Wi-Fi Protected Access* - технологія захищеного доступу до безпроводових мереж) - це тимчасовий стандарт, про який домовилися виробники устаткування, поки не набув чинності *IEEE 802.11i*. По суті, **WPA = 802.1x + EAP + TKIP + MIC**, де:

- *TKIP* - протокол інтеграції тимчасового ключа (*Temporal Key Integrity Protocol*),
- *MIC* - технологія перевірки цілісності повідомлень (*Message Integrity Check*).

Протокол *TKIP* використовує автоматично підібрані 128-бітові ключі, які створюються непередбачуваним способом, а загальне число варіацій яких досягає 500 млрд. Складна ієрархічна система алгоритму підбору ключів і динамічна їх заміна через кожні 10 кбайт (10 тис. переданих пакетів) забезпечують максимальну захищеність системі.

Від зовнішнього проникнення і зміни інформації також захищає технологія перевірки цілісності повідомлень (*MIC*). Досить складний математичний алгоритм дозволяє звіряти відправлені в одній точці і отримані в іншій дані. Якщо визначені зміни повідомлення і результат порівняння не сходиться, такі дані вважаються помилковими і відкидаються.

Крім того, протокол *WPA2* підтримує шифрування за вдосконаленим стандартом *AES (Advanced Encryption Standard)*, який використовує ключі до 256 біт і відрізняється більш стійким криптоалгоритмом, ніж це реалізовано в протоколах *WEP* і *TKIP*.

Різниця між *WPA2 Personal* і *WPA2 Enterprise* полягає в тому, звідки беруться ключі шифрування, що використовуються в механіці алгоритму *AES*. Для приватних (домашніх) мереж використовується статичний ключ (пароль, кодове слово, *PSK (Pre-Shared Key)*) мінімальною довжиною 8 символів (до 63), який задається в настройках точки доступу, і для всіх клієнтів даної безпроводової мережі є однаковим. Компрометація такого ключа (проговорилися сусідові, звільнений співробітник, вкрадений ноутбук) вимагає негайної зміни пароля у всіх інших користувачів. Для корпоративних мереж використовується динамічний ключ, індивідуальний для кожного працюючого клієнта в даний момент. Цей ключ може періодично оновлюватися по ходу роботи без розриву з'єднання, і за його генерацію відповідає додатковий компонент - сервер авторизації, і майже завжди це *RADIUS*-сервер.

Технологія віртуальних приватних мереж ***VPN (Virtual Private Network)*** була запропонована компанією *Intel* для утворення безпечного з'єднання клієнтських систем із серверами по загальнодоступним інтернет-каналам. Технологій шифрування в *VPN* застосовується декілька, найбільш популярні з них описані протоколами *PPTP*, *L2TP* і *IPSec* із алгоритмами шифрування *DES*, *Triple DES*, *AES* і *MD5*. Для реалізації *VPN*-захисту в рамках мережі необхідно встановити спеціальний *VPN*-шлюз (програмний або апаратний), в якому створюються тунелі, по одному на кожного користувача. Наприклад, для безпроводових мереж шлюз слід встановити безпосередньо перед точкою доступу. А користувачам мережі потрібно налаштувати спеціальні клієнтські програми, які в свою чергу також працюють за рамками безпроводової мережі.

24.3. Радіоспецифікація безпроводових персональних мереж *Bluetooth*. Стандарт *IEEE 802.15.x*

Ця технологія була представлена шведським виробником мобільних засобів зв'язку *Ericsson* ще у 1994р. і стала стандартом у 1998р. для різних малопотужних, діючих на близькій відстані безпроводових пристроїв, тобто для реалізації персонального безпроводового зв'язку між різними пристроями вдома і в офісі. Свою назву технологія *Bluetooth* (з англ. — «голубий зуб») отримала від англійського прізвиська датського короля Гарольда Першого Синьозубого, який об'єднав в X столітті під своїм керівництвом Данію і Норвегію. За ініціативою розробників цієї технології назва *Bluetooth* у наш час стала символізувати об'єднання різних електронних пристроїв.



В даний час розробки в області *Bluetooth* ведуться групою ***Bluetooth SIG*** (англ. *Special Interest Group*), до якої входять *Ericsson, IBM, Intel, Nokia, Toshiba Lucent, Microsoft* та інші компанії, чия діяльність пов'язана з мережевими технологіями. Згодом *Bluetooth SIG* і *IEEE* досягли угоди, на основі якої специфікація *Bluetooth* стала частиною стандарту *IEEE 802.15.1* (дата публікації — 14 червня 2002 року).

В радіоспецифікації представлені основні характеристики радіоінтерфейсу *Bluetooth*. Деякі ключові параметри представлені в таблиці 24.7.

Таблиця 24.7

Топологія	До 7 одночасних каналів у логічній зіркоподібній мережі
Модуляція	<i>GFSK, PSK</i> (з <i>EDR</i>)
Максимальна швидкість передачі даних	1 Мбіт/с (<i>v 1.0</i>); 3 Мбіт/с (<i>v 2.0+EDR</i>); 24 Мбіт/с (<i>v 3.0 + HS</i>)
Ширина смуги радіочастот	1 МГц (по рівню мінус 20 дБ)
Діапазон радіочастот	2,4 ... 2,4835 ГГц (діапазон <i>ISM</i>)
Кількість несучих частот	23 (Японія, Франція, Іспанія)/ 79 (США, решта країн Європи)
Рознесення несучих частот	1 МГц
Потужність передачі *	до 0,1 Вт
Схема доступу до пікомережі	<i>FH-TDD-TDMA</i>
Швидкість зміни частоти (<i>FH</i>)	1600 разів на секунду

*В радіоспецифікації визначено три класи передавачів для пристроїв *Bluetooth* на основі їх вихідної потужності:

– **Клас 1.** Межі зміни потужності вихідного сигналу: від 1 мВт (0 дБм) до 100 мВт (+20 дБм). Контроль потужності обов'язковий. Даний режим забезпечує найбільшу відстань зв'язку (до 100 м).

– **Клас 2.** Межі зміни потужності: від 0,25 мВт (-6 дБм) до 2,5 мВт (+4 дБм). Контроль потужності – за бажанням (дальність зв'язку до 10 м).

– **Клас 3.** Номінальна потужність – 1 мВт (дальність зв'язку до 1 м).

Інтерфейс *Bluetooth* дозволяє передавати як голос (зі швидкістю 64 кбіт/сек), так і дані. Для передачі даних можуть бути використані асиметричний (721 кбіт/сек в одному напрямку і 57,6 кбіт/сек в іншому) та симетричний (432,6 кбіт/сек в обох напрямках) методи.

В пристроях *Bluetooth* використовується діапазон 2,4 ГГц із 79 (для США і Європи) фізичними каналами шириною 1 МГц.

Кожен канал ділиться на часові сегменти (технологія TDMA) тривалістю 625 мкс, причому кожному сегменту відповідає певний підканал. Передавач в кожен момент часу використовує тільки один підканал. Стрибки по частоті відбуваються синхронно в передавачі і приймачі в наперед зафіксованій псевдовипадковій послідовності (див. табл. 24.1). За секунду може відбуватися до 1600 частотних стрибків.

Використовується псевдовипадкова перебудова частоти (*FH – frequency hopping*) для боротьби з інтерференцією і ефектами багатопроменевого розповсюдження і для забезпечення схеми множинного доступу сусіднім пристроям з різних пікомереж.

У стандарті *Bluetooth* передбачена дуплексна передача на основі часового розділення (*TDD - Time Division Duplex*). Основний пристрій передає пакети в непарні сегменти часу, а підлеглий пристрій – в парні. Пакети, в залежності від довжини, можуть займати до п'яти часових сегментів. При цьому частота каналу не змінюється до закінчення передачі пакету.

Тобто, схему доступу пристрою *Bluetooth* до пікомережі можна позначити як ***FH-TDD-TDMA***.

Протокол *Bluetooth* може підтримувати асинхронний канал даних, до трьох синхронних (з постійною швидкістю) голосових каналів або канал з одночасною асинхронною передачею даних і синхронною передачею голосу. Швидкість кожного голосового каналу – 64 кбіт/с в кожному напрямку, асинхронного в асиметричному режимі – до 723,2 кбіт/с в прямому і 57,6 кбіт/с в зворотному напрямках або до 433,9 кбіт/с в кожному напрямку в симетричному (повнодуплексному) режимі.

Синхронне з'єднання (*SCO*) можливе тільки в режимі «точка-точка». Такий спосіб зв'язку застосовується для передачі інформації, яка є чутливою до затримок, наприклад, голосу. Основний пристрій підтримує до трьох синхронних з'єднань, підпорядкований – до трьох синхронних з'єднань з одним основним пристроєм або до двох – з різними пристроями. При синхронному з'єднанні основний пристрій резервує часові сегменти, які слідує через так звані *SCO*-інтервали. Навіть якщо пакет прийнятий з помилкою, повторно при синхронному з'єднанні він не передається.

При асинхронному зв'язку (*ASL*) використовуються часові сегменти, не зарезервовані для синхронного з'єднання. Асинхронне з'єднання можливе між основним і всіма активними підлеглими пристроями в пікомережі. Основний і підлеглий пристрій можуть підтримувати тільки

одне асинхронне з'єднання. Оскільки в пікомережі може бути декілька підлеглих пристроїв, конкретний підлеглий пристрій відправляє пакет основному, тільки якщо в попередньому часовому інтервалі на його адресу прийшов пакет від основного пристрою. Якщо в адресному полі *ASL*- пакету адреса не вказана, пакет вважається "широкомовним" – його можуть приймати всі пристрої. Асинхронне з'єднання дозволяє повторно передавати пакети, прийняті з помилками.

В пакетах *ASL* використовуються різні формати даних. Можливі три варіанти: 80, 160 і 240 біт, решта біт використовується для корекції помилок. З цієї причини варіант з 80 бітами є найнадійнішим. При цьому дані повторюються три рази ($80 \times 3 = 240$). Фактично застосовується той же спосіб, що і у випадку заголовка. Поле даних пакету *SCO* завжди має 240 біт. Оскільки підлегли вузли можуть використовувати тільки непарні часові інтервали, то їм дістається 800 інтервалів в секунду, стільки ж отримує і головний вузол. При 80 бітних даних в пакеті підлеглий вузол може передати зі швидкістю 64 кбіт/с. Цього цілком достатньо для мовного обміну. При найбільш ненадійному варіанті (240 біт даних в пакеті) можна отримати три повнодуплексні мовні зв'язки. Це і обмежує максимальне число *SCO* з'єднань.

Безпека протоколу організовується за допомогою механізму автентифікації і шифрування даних, які передаються. Ключ авторизації має довжину 128 біт. Довжина ключа шифрування може бути в межах 8...128 біт. Крім того, з метою безпеки використовують ключі з'єднання (*link key*), які можуть бути напівпостійними і тимчасовими. Перші зберігаються в незалежній пам'яті, другі – оновлюються при кожному з'єднанні.

В технології *Bluetooth* перетворення мови у цифровий вигляд відбувається за допомогою дельта-модуляції з безперервною змінною огинаючої (*CVSD* – *continuously variable slope delta*). Тому отриманий мовний сигнал в цифровому вигляді перетворюється в послідовність згідно схеми кодування мови *CVSD*.

Дельта-модуляція представляє собою впровадження низької роздільної здатності аналогово-цифрового перетворювача в контур зворотного зв'язку дискретних даних. Причиною виникнення даної технології стало те, що в процесі перетворення швидкість – це менш дорогий ресурс, ніж точність, тому більшу користь можна отримати від більш швидких процесів обробки сигналів для отримання більш високої точності.

CVSD – це різновидність дельта-модуляції. При даному виді модуляції аналогові вхідні дані апроксимуються ступінчатою функцією, значення якої змінюється на один рівень квантування (δ) на кожному інтервалі дискретизації (T_s). Таким чином, для представлення виходу дельта-модуляції достатньо одного біта на вибірку. По суті потік таких біт – це апроксимація похідної аналогового сигналу, а не його амплітуди. Генерується значення 1, якщо ступінчата функція збільшує своє

значення на наступному інтервалі дискретизації, в іншому випадку генерується 0. Схема *CVSD* призначена для мінімізації як помилок шуму квантування, так і помилок шуму перевантаження по крутизні, коли сигнал різко змінюється. Мінімізація досягається шляхом застосування різних рівнів квантування: малих, коли сигнал змінюється повільно і великих, коли сигнал змінюється різко. Крутизна сигналу визначається на основі вивчення K попередніх біт вихідних даних. Утворена в результаті схема більш стійка до помилок, ніж *IKM* і до помилок квантування та перевантаження по крутизні. Як і при дельта-модуляції, двійковий вихід перетворюється в ступінчасту функцію, яка намагається максимально близько повторити оригінал.

В *Bluetooth* технології використовується *GFSK* модуляція - це двопозиційна частотна маніпуляція із фільтром Гауса ("1" представляється позитивним відхиленням від центральної частоти, "0" – від'ємним). Мінімальне відхилення частоти – 115 кГц. Для зменшення ширини спектру при використанні *GFSK*-модуляції передбачена зміна частоти за законом Гауса, що значно зменшує гармоніки вищих порядків. *GFSK*-модуляція, яка використовується в *Bluetooth* технології характеризується індексом модуляції 0,32. У версіях 2.0+*EDR* та вище сумісно із *GFSK*-модуляцією застосовують і *PSK*-модуляцію в двох варіантах ($\pi/4$ -*DQPSK* та *8DPSK*), що збільшує у 3 рази максимальну швидкість передачі.

Для передачі мовних повідомлень при синхронному з'єднанні використовуються три схеми передачі пакетів: *HV1*, *HV2*, *HV3*. Вони відрізняються між собою реалізацією схеми захисту від помилок. Схема передачі *HV1* використовує схему захисту від помилок *FEC* 1/3, згідно з якою передаються три копії одного пакету. На приймальній стороні використовується мажоритарна логіка для детектування прийнятого сигналу, тобто яких бітів в прийнятій трійці більше, той біт і вважається правильним. Схема передачі *HV2* передбачає використання схеми захисту від помилок *FEC* 2/3, згідно з якою використовується завадостійке кодування – код Хемінга з параметрами (15,10) і надлишковістю 0,267. Даний код дозволяє виправляти всі однократні і виявляти всі двократні помилки. Схема передачі *HV3* не використовує схеми захисту від помилок. Розірвання каналу зв'язку відбувається при кількості помилково прийнятих пакетів більше 15% від загальної кількості переданих.

Передача даних в системі *Bluetooth* захищена від перехвату і несанкціонованого використання. Під час встановлення зв'язку здійснюється процес автентифікації задіяних станцій. Станція, що ініціює цей процес, посилає станції, що викликається, 48-бітову адресу, на що остання відповідає 128-бітовим блоком. На основі цього блоку, 128-бітового таємного ключа і 48-бітової адреси приймача, обидві станції генерують підписану відповідь (англ. *Signed RESponse* – *SRES*). Підписана відповідь передається ініціюючою станцією отримувачу, який

порівнює її з блоком *SRES*, обчисленим самостійно. Якщо обидва блоки співпадають, то автентифікація вважається успішною.

Послідовності бітів корисного навантаження додатково шифруються додаванням по модулю 2 із вихідним сигналом регістра зсуву з лінійним зворотним зв'язком (*LFSR*), який відповідним чином ініціалізований в кожному часовому слоті. Більш досконалі алгоритми забезпечення конфіденційності використовуються на верхніх рівнях передачі даних, які не відносяться до системи.

Було розроблено декілька специфікацій (версій) технології, починаючи з *Bluetooth 1.0*, яка мала багато недоліків. В подальших версіях застосовувалися різні технології з метою усунення проблем сумісності різних пристроїв, покращення якості передачі мови (наприклад, технологія **eSCO**, яка передбачає повторну передачу пошкоджених пакетів), підвищення стійкості до завад (наприклад, **AFH** - адаптивна перестройка частоти), підвищення швидкості передачі (наприклад, технології **EDR** - *Enhanced Data Rate* та **HS**), зниження електроспоживання та підвищення рівня захисту даних.

Протокол *Bluetooth* підтримує як з'єднання типу «точка – точка», так і «точка – багато-точка». Два або більше пристроїв, які використовують один і той же канал, утворюють пікомережу (*piconet*). Один із пристроїв працює як основний (*master*), а інші – як підлеглі. У одній пікомережі може бути до семи активних підлеглих пристроїв, при цьому решта підлеглих пристроїв знаходиться в стані “паркування”, залишаючись синхронізованими з основним пристроєм.

Автоматичне встановлення з'єднання між *Bluetooth*-пристроями, що знаходяться в межах досяжності, є однією з найважливіших особливостей *Bluetooth*, тому перше, з чого починається робота *Bluetooth*-пристроїв у незнайомому оточенні – це пошук інших пристроїв *Bluetooth*. Для цього відсилається запит, і відповідь на нього залежить не тільки від наявності в радіусі зв'язку активних *Bluetooth*-пристроїв, але й від режиму, в якому знаходяться пристрої. На цьому етапі пристрої можуть знаходитися в трьох режимах:

1. *Discoverable* (що піддаються виявленню) - в цьому режимі пристрої завжди відповідають на всі отримані ними запити.

2. *Limited discoverable* (що піддаються виявленню з обмеженням) - у цьому режимі знаходяться пристрої, які можуть відповідати на запити тільки обмежений час або повинні відповідати тільки при дотриманні певних умов.

3. *Non-discoverable* (непіддатливі виявленню) - в цьому режимі пристрої не відповідають на нові запити.

Ще однією з найважливіших особливостей *Bluetooth* є автоматичне підключення *Bluetooth*-пристроїв до служб, що надаються іншими *Bluetooth*-пристроями. Тому, після того, як є список імен і адрес, виконується пошук доступних послуг, що надаються різними пристроями.

Для пошуку можливих послуг використовується спеціальний протокол виявлення послуг (*SDP - Service Discovery Protocol*).

Для взаємодії *Bluetooth* - пристроїв застосовуються так звані *Bluetooth* - профілі. Ці профілі є протоколами взаємодії пристроїв, які призначені для конкретного сервісу.

Приклади профілів, що визначені і схвалені групою розробки *Bluetooth SIG*:

- *Advanced Audio Distribution Profile (A2DP)* - розроблений для передачі двоканального стерео аудіопотоку, наприклад музики, до беспроводової гарнітури або колонок.
- *Audio/Video Remote Control Profile (AVRCP)* - розроблений для управління стандартними функціями телевізорів, *Hi-Fi* устаткування та інш.
- *Basic Imaging Profile (BIP)* - розроблений для пересилки зображень між пристроями і включає можливість зміни розміру зображення і конвертацію в формат, який підтримує приймаючий пристрій.
- *Cordless Telephony Profile (CTP)* - профіль беспроводової телефонії.
- *Device ID Profile (DID)* - дозволяє ідентифікувати клас пристрою, виробника, версію продукту.
- *Dial-up Networking Profile (DUN)* - протокол надає стандартний доступ до інтернету або іншого телефонного сервісу через *Bluetooth*.
- *Hands-Free Profile (HFP)* - профіль використовується для з'єднання беспроводової гарнітури і телефону, передає звук моно в одному каналі.
- *Human Interface Device Profile (HID)* - забезпечує підтримку пристроїв з *HID (Human Interface Device)*, таких як «мишки», джойстики, клавіатури. Використовує повільний канал та мінімальну потужність.
- *HeadSet Profile (HSP)* - використовується для з'єднання беспроводової гарнітури з мобільним телефоном. Підтримує мінімальний набір команд специфікації *GSM 07.07* для забезпечення можливості здійснювати дзвінки, відповідати на них, завершувати дзвінок, налаштувати гучність.
- *InterCom Profile (ICP)* - забезпечує голосові дзвінки між *Bluetooth* сумісними пристроями.
- *Object Push Profile (OPP)* - базовий профіль для пересилки «об'єктів» таких як зображення, віртуальні візитні картки та інш.
- *Personal Area Networking Profile (PAN)* - профіль дозволяє використовувати протокол *Bluetooth Network Encapsulation* як транспорт через *Bluetooth*-з'єднання.

24.4. Радіоінтерфейс міських безпроводових мереж *WiMAX*. Стандарт *IEEE 802.16x*

При всьому різноманітті безпроводових мережевих підключень складно одночасно виконати три основні вимоги до таких з'єднань: високу пропускну спроможність, надійність і мобільність. Вирішити подібну задачу може наступне покоління безпроводових технологій - **WiMAX** (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), стандарт *IEEE 802.16x*. *WiMAX* відносять до технологій поколінь 3G та 4G. Ці технології були орієнтовані на створення стаціонарних безпроводових мереж масштабу мегаполіса (*WMAN*).



Для просування і розвитку технології *WiMAX* був сформований *WiMAX*-форум (<http://www.wimaxforum.org>) на базі робочої групи по розробці стандарту для безпроводового широкосмугового доступу *IEEE 802.16x*, створеної в 1999 році. До форуму увійшли такі фірми, як *Nokia, Harris Corporation, Ensemble, Crosspan i Aperto*. У травні 2005 року форум об'єднав вже більше 230 учасників, а в 2011 році – більше 522.



Мережа *WiMAX* складається з двох основних частин (рис.24.14):

- базової станції *WiMAX*, яка може розміщуватися на висотному об'єкті - будівлі або вежі;
- абонентського обладнання *WiMAX*.

Крім того, передбачено обладнання для зв'язку між базовими станціями та постачальниками сервісів та Інтернет.

З'єднання між базовою станцією і абонентською здійснюється у НВЧ діапазоні 2...11 ГГц. Дане з'єднання в ідеальних умовах дозволяє передавати дані із швидкістю до 20 Мбіт/с і не вимагає, щоб базова станція знаходилася на відстані прямій видимості від користувача. Цей режим роботи базової станції *WiMAX* близький стандарту *IEEE 802.11x (Wi-Fi)*. Технологія *WiMAX* застосовується як на "останній милі" - кінцевій ділянці між провайдером і користувачем, так і для надання доступу регіональним мережам: корпоративним, районним.

Між сусідніми базовими станціями встановлюється постійне з'єднання з використанням діапазону частот 10...66 ГГц радіозв'язку прямої видимості. Дане з'єднання в ідеальних умовах дозволяє передавати дані з швидкістю до 120 Мбіт/с. Обмеження по умові прямої видимості, зрозуміло, не є перевагою, проте воно накладається тільки на базові станції, які беруть участь в покритті району, що можливо цілком реалізувати при відповідному розміщенні антенного устаткування. Як мінімум одна із базових станцій може бути постійно пов'язана через широкосмугове швидкісне з'єднання із мережею провайдера, який надає сервісні послуги.

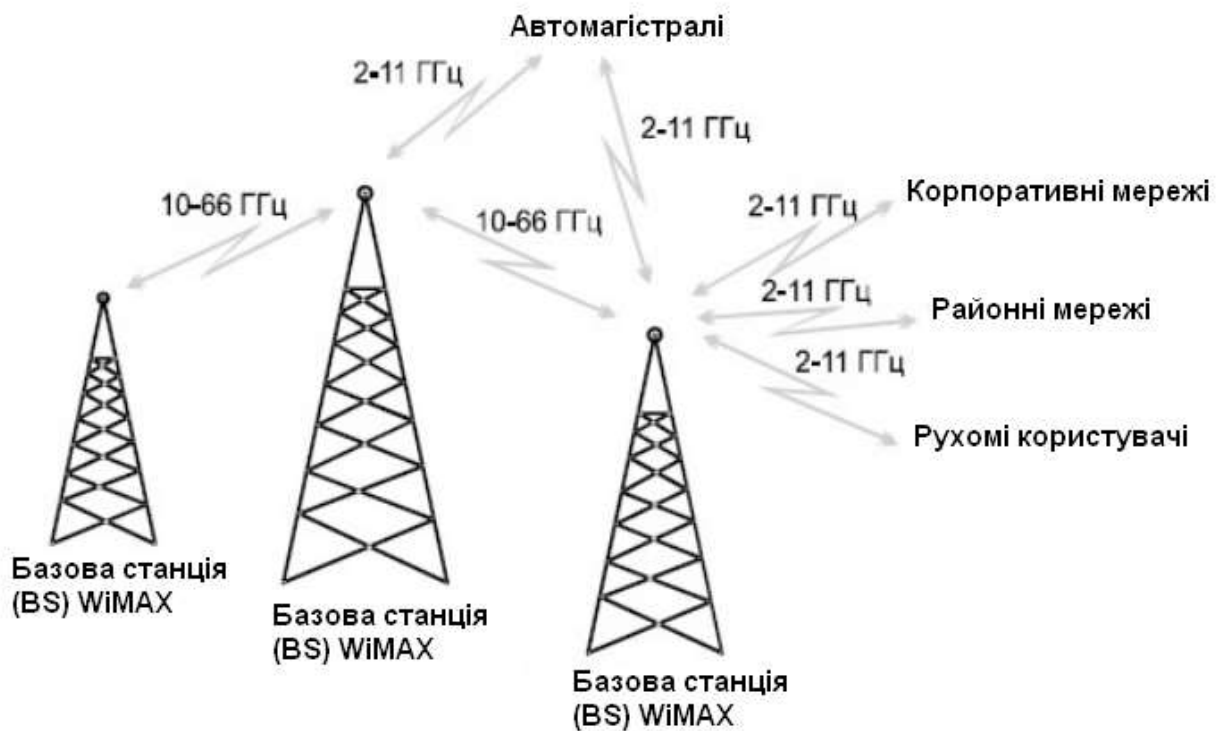


Рис.24.14. Структура мережі *WiMAX*

Режими роботи

Стандарт 802.16e-2005 об'єднує в собі можливості попередніх версій *WiMAX* і на даний момент забезпечує наступні режими роботи:

1. *Fixed WiMAX* - фіксований доступ.
2. *Nomadic WiMAX* - сеансовий доступ.
3. *Portable WiMAX* - доступ в режимі переміщення.
4. *Mobile WiMAX* - мобільний доступ.

Fixed WiMAX

Фіксований доступ є альтернативою широкосмуговим проводимим технологіям (*xDSL*, *T1/E1* і т. п.). Стандарт використовує діапазон частот 10...66 ГГц. Цей частотний діапазон через сильне загасання хвиль вимагає прямої видимості між передавачем і приймачем сигналу. З іншого боку, даний частотний діапазон дозволяє уникнути однієї з головних проблем радіозв'язку УКХ-діапазону - багатопроменевого розповсюдження сигналу. При цьому ширина каналів зв'язку в цьому частотному діапазоні досить велика (типове значення - 25 або 28 МГц), що дозволяє досягати швидкостей передачі до 120 Мбіт/с. Фіксований режим був включений у версію стандарту 802.16d-2004 і використовується у ряді країн.

Nomadic WiMAX

Сеансовий (кочівний) доступ додав поняття сесій до вже існуючого *Fixed WiMAX*. Наявність сесій дозволяє вільно переміщатися клієнтському устаткуванню між сесіями і відновлювати з'єднання вже за

допомогою інших базових станцій мережі *WiMAX*, ніж ті, що використовувалися під час попередньої сесії. Такий режим розроблений в основному для портативних пристроїв, таких як ноутбуки, КПК.

Portable WiMAX

Для режиму *Portable WiMAX* додана можливість автоматичного перемикавання клієнта від однієї базової станції *WiMAX* до іншої без втрати з'єднання. Проте для даного режиму обмежена швидкість пересування клієнтського устаткування до 40 км/год. Введення даного режиму зробило доцільним використовувати технології *WiMAX* для смартфонів і КПК.

Mobile WiMAX

Цей режим був розроблений в стандарті 802.16e-2005 і дозволив збільшити швидкість переміщення клієнтського устаткування до 120 км/год. Основні особливості цього режиму:

- стійкість до багатопроменевого розповсюдження сигналу і власних завад;
- пропускна спроможність каналу регулюється в залежності від якості радіоканалу;
- технологія часового дуплексу *TDD*, яка дозволяє ефективно обробляти асиметричний трафік і спрощує управління складними антенними системами за рахунок естафетної передачі сесії між каналами;
- технологія *Hybrid-Automatic Repeat Request (H-ARQ)*, яка дозволяє зберігати стійке з'єднання при різкій зміні напрямку руху клієнтського устаткування;
- розподіл частот, що виділяються, і використання субканалів при високому завантаженні дозволяє оптимізувати передачу даних з урахуванням потужності сигналу клієнтського устаткування;
- управління енергозбереженням дозволяє оптимізувати витрати енергії на підтримку зв'язку портативних пристроїв у режимі очікування або простою;
- технологія *Network-Optimized Hard Handoff (NHO)*, яка дозволяє до 50 мс і менше скоротити час на перемикавання клієнта між каналами;
- технологія *Multicast and Broadcast Service (MBS)*, яка об'єднує функції *DVB-H*, *MediaFLO* і *3GPP E-UTRA* для досягнення високої швидкості передачі даних з використанням одночастотної мережі, гнучкого розподілу радіочастот, низького споживання енергії портативними пристроями, швидкого перемикавання між каналами;
- технологія *Smart Antenna*, що підтримує субканали і естафетну передачу сесії між каналами, що дозволяє використовувати складні системи антен, включаючи формування діаграми

спрямованості, просторово-часову маркіровку, просторове мультиплексування (ущільнення);

- технологія *Fractional Frequency Reuse*, яка дозволяє контролювати накладення/перетин каналів для повторного використання частот з мінімальними втратами;
- розмір фрейму в 5 мс забезпечує компроміс між надійністю передачі даних за рахунок використання малих пакетів і не вигідними витратами за рахунок збільшення числа пакетів (і, як наслідок, заголовків).

В стандарті (див. табл.24.8) передбачені діапазони 2...11 ГГц (*IEEE 802.16a*) і 10...66 ГГц (*IEEE 802.16*). В діапазоні 10...66 ГГц радіозв'язок можливий лише у разі прямої видимості між елементами мережі. Використовується часовий розподіл каналів, при якому кожному активному абоненту виділяються часові вікна (слоти). Розділення дуплексних каналів реалізується по частоті (*FDD*) або за часом (*TDD*). Залежно від віддаленості абонентів підтримується адаптація виду модуляції і способів кодування.

Характеристики сімейства стандартів *IEEE 802.16x*

Таблиця 24.8

Стандарт \ Характеристика	802.16	802.16a/d	802.16e
Дата прийняття	2001	2003-2004	2004
Частотний діапазон, ГГц	10...66	2...11	2...6
Тип радіозв'язку в мережі	фіксований	фіксований	рухомий
Умови покриття	зона прямої видимості	поза зоною прямої видимості	поза зоною прямої видимості
Радіус зони покриття, км	2...4	4...6 (макс. до 50)	4...6
Швидкість передачі, Мбіт/с	32...135 (при смузі каналу 28 МГц)	до 75 (при смузі каналу 20 МГц)	до 15 (при смузі каналу 5 МГц)
Модуляція	<i>QPSK</i> , 16- <i>QAM</i> , 64- <i>QAM</i>	<i>OFDM</i> 256, <i>QPSK</i> , 16- <i>QAM</i> , 64- <i>QAM</i>	<i>OFDM</i> 256, <i>QPSK</i> , 16- <i>QAM</i> , 64- <i>QAM</i>
Смуга частот каналу, МГц	20; 25; 28	регулюєма в діапазоні 1,25...20	

В діапазоні 2...11 ГГц підтримуються три специфікації радіоінтерфейсів, які допускають можливість вирішення задач радіозв'язку в умовах багатопроменевого розповсюдження і за відсутності прямої видимості (*NLOS*):

– радіоінтерфейс *WMAN-SC* – використовує модуляцію однієї несучої;

– радіоінтерфейс *WMAN-OFDM* – використовує ортогональну частотну модуляцію (*OFDM*) із швидким перетворенням Фур'є на 256 точок;

- радіоінтерфейс *WMAN-OFDMA* – використовує *OFDM*-модуляцію сигналу і множинний доступ з ортогональним частотним розділенням (*OFDMA - OFD Multiple Access*) із швидким перетворенням Фур'є до 2048 точок, тобто кількість піднесучих частот не фіксується, а може складати 512, 1024, 2048.

В радіоінтерфейсі діапазону 10...66 ГГц застосовується модуляція однієї несучої з адаптивною настройкою параметрів модуляції, кодування та потужності для кожної абонентської станції індивідуально. Розділення дуплексних каналів переважно часове (*TDD*). Ширина смуги частот корисного сигналу складає $\Delta F = 20$ МГц (в США – 25 МГц, в Європі – 28 МГц).

Стандарт підтримує різноманітні види модуляції: *BPSK*, *QPSK*, *16-QAM*, *64-QAM*.

Управління потужністю передачі в радіоканалах здійснюється за допомогою алгоритму точної настройки. Швидкість зміни потужності – 10 дБ/с, межі зміни потужності (динамічний діапазон) – не менше 40 дБ.

Для підвищення завадостійкості при передачі даних в протоколі 802.16 передбачені такі традиційні технології, як згортаюче кодування з декодуванням по алгоритму Вітербі, коди Ріда-Соломона.

В жовтні 2010 року інститут інженерів електроніки та електротехніки (*IEEE*) затвердив стандарт *IEEE 802.16m*, відомий як *WirelessMAN-Advanced* або *WiMAX-2*. Він дозволяє підвищити пропускну здатність безпроводових мереж в кілька разів. Так, стаціонарне обладнання в мережах нового покоління зможе приймати дані на швидкості до 1 Гбіт/с, а мобільні гаджети та портативні комп'ютери - до 100 Мбіт/с. При цьому збережеться зворотна сумісність з існуючим устаткуванням *WiMAX*.

Стандарт *WiMAX 3.0 (IEEE 802.16n)*, покликаний прийти на зміну стандарту *WiMAX-2*, буде ще більш швидким і універсальним.

Порівняльна таблиця стандартів безпроводового радіодоступу

Табл. 24.10

Технологія	Стандарт	Призначення	Максимальна швидкість передачі, Мбіт/с	Радіус дії, м	Діапазон частот, ГГц
WiMax	802.16d	фіксований WMAN	75	до 25..80 км	1,5...11
WiMax	802.16e	мобільний WMAN	40	до 1...5 км	2,3...13,6
WiMax	802.16m	фіксований WMAN мобільний WMAN	1000 100	-	-
LTE		WMAN	173 (download) 58 (upload)	-	-
Wi-Fi	802.11a	WLAN	54	до 100	5,0
Wi-Fi	802.11b	WLAN	11	до 100	2,4
Wi-Fi	802.11g	WLAN	54	до 100	2,4
Wi-Fi	802.11n	WLAN	300	до 100	2,4; 5,0
Wi-Fi	802.11ac	WLAN	6770	н/д	5,0
Bluetooth v. 1.1.	802.15.1	WPAN	1	до 10	2,4
Bluetooth v. 2.1.	802.15.2	WPAN	2,1	до 10	2,4
Bluetooth v. 3.0.	802.15.3	WPAN	24	до 10	2,4
UWB	802.15.3a	WPAN	480	до 10	7,5
ZigBee	802.15.4	WPAN	0,250	до 100	2,4 (16 кан.); 0,915 (10 кан.); 0,868 (1 кан.)
Wibree		WPAN	1	до 10	2,4
Інфрачервоний порт	<i>IrDa</i> 1.1	WPAN	4	0,5(двобічн. зв'язок), 10(однобічн. зв'язок)	$\lambda=850\dots900\text{нм}$

Питання самоконтролю до IV розділу

1. Призначення та основні стандарти систем бездротової телефонії.
2. Поясніть схему доступу в стандарті *Tetra MC/TDMA/TDD*.
3. Як в стандарті *Tetra* забезпечується інформаційна безпека?
4. В чому різниця систем *LMDS* та *MMDS*?
5. Як класифікуються мережі передачі даних?
6. Які основні елементи та режими роботи безпроводової локальної мережі?
7. В яких режимах працюють безпроводові точки доступу?
8. Яке призначення та основні характеристики стандарту *IEEE 802.15.x*?
9. Поясніть схему доступу в технології *Bluetooth FH-TDD-TDMA*.
10. Основні характеристики сімейства стандартів *IEEE 802.11.x*. Які специфікації сумісні?
11. Які особливості формування частотних каналів в діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц?
12. Від чого залежить вибір індексу модуляції та схеми кодування обладнання *WiFi*?
13. Які загрози існують для безпроводових мереж?
14. Які технології використовують для забезпечення безпеки мереж *WiFi*?
15. Що таке технологія *MIMO* і її застосування у безпроводових локальних мережах?
16. Архітектура, особливості функціонування та основні характеристики безпроводових міських мереж.
17. Основні режими роботи мережі *WiMax*.
18. Які радіоінтерфейси застосовують мережі *WiMax*?

V. Системи визначення власного місцезнаходження

25. Супутникова система навігації

25.1. Призначення та загальна структура системи

Супутникова система навігації — це комплексна електронно-технічна система, що складається із сукупності наземного і космічного устаткування та призначена для визначення місцеположення (географічних координат і висоти), а також параметрів руху (швидкості, напрямку руху, і т. і.) для наземних, водних і повітряних об'єктів.



Ці системи мають подвійне призначення. Спочатку вони були розроблені на замовлення і під контролем військових для потреб Міністерств оборони відповідних країн і тому перше, і основне призначення систем - **стратегічне**, друге призначення - **цивільне**. Крім того слід відмітити, що на особливий період (військові дії, терористичні акти тощо) Міністерства оборони країн, які є власниками цих систем, можуть приймати рішення про повне відключення послуги навігації для цивільних. Виходячи з цього, всі діючі нині супутники навігаційних систем передають два види сигналів: стандартної точності для цивільних користувачів і високої точності для військових користувачів (цей сигнал закодований і доступний тільки при наданні відповідного рівня доступу від Міністерства оборони).

Області застосування глобальної навігаційної супутникової системи (англ. *GNSS - Global Navigation Satellites System*):

- потреби Міністерства оборони та інших спеціальних підрозділів;
- авіація;
- морський і річковий транспорт;
- наземний транспорт;
- геодезія та картографія;
- будівництво;
- рятувальні роботи, тощо.

В даний час працюють або готуються до розгортання наступні системи супутникової навігації:

- **GPS** (англ. *Global Positioning System* - глобальна система визначення місцезнаходження), що належить міністерству оборони США. Єдина повністю працююча супутникова навігаційна система, яка також відома під більш ранньою назвою **NAVSTAR** (англ. *Navigation System using Timing And Ranging* - навігаційна система з вимірюванням часу та відстані).

- **ГЛОНАСС** (ГЛОбальна НАвігаційна Супутникова Система), що належить міністерству оборони Росії. Знаходиться на етапі повторного розгортання супутникового угруповання.

- **«Бейдоу» (Compass)**, яка розгорнута Китаєм та призначена для регіонального використання тільки в цій країні. Особливість — невелика

кількість супутників, що знаходяться на геостаціонарних орбітах. У 2011 році виведено на орбіту Землі 8 навігаційних супутників. Згідно з планами до 2012 року система зможе покривати Азіатсько-тихоокеанський регіон, а до 2020 року, коли кількість супутників буде збільшена, система "Бейдоу" зможе працювати як глобальна. Реалізація даної програми почалася в 2000 році. Перший супутник вийшов на орбіту в 2007 році.

- **Галілео (Galileo)** - сумісний проект супутникової системи навігації Європейського союзу і Європейського космічного агентства та є частиною транспортного проекту Транс'європейські мережі (англ. *Trans-European Networks*). Система призначена для вирішення навігаційних задач для будь-яких рухомих об'єктів з точністю менше 1 метра. Зараз система знаходиться на етапі розгортання супутникового угруповання.

- **IRNSS** (англ. *Indian Regional Navigation Satellite System*) - індійська регіональна навігаційна супутникова система. Загальна запланована кількість супутників – 7 на геосинхронних орбітах. Зараз знаходиться в стані розробки. Передбачається для використання тільки в цій країні. Перший супутник був запущений в 2008 році.

Навігаційна супутникова система (GNSS) - це дуже складний і дорогий в експлуатації механізм і належить державам (Міністерству оборони тих країн, де розроблялася та впроваджувалася). Ці системи є також стратегічним видом озброєння країн. У разі виникнення бойових дій мирна з вигляду технологія може бути задіяний для наведення високоточної зброї, десантування вантажів, орієнтування на місцевості цілих підрозділів, проведення розвідувально-диверсійних операцій і як результат - серйозна перевага в швидкості і точності позиціонування перед супротивником, що не має власних технологій супутникового позиціонування. Керування таким механізмом може здійснювати тільки Міністерство оборони. Управління орбітальним угрупованням NAVSTAR здійснюється з головної контрольної станції, розташованої на авіабазі ВВС США Шривер (*Schriever*) штат Колорадо Спрінгс. Стеження і управління орбітальним угрупованням ГЛОНАСС здійснюється Космічними військами Росії з головною контрольною станцією в м. Краснознаменськ.

Основними елементами супутникової системи навігації є(рис. 25.1):

- **орбітальне угруповання** (космічний сектор), що складається з декількох (від 2 до 30) супутників, які випромінюють спеціальні радіосигнали;

- **наземна система управління і контролю**, що включає блоки вимірювання поточного положення супутників і передачі на них отриманої інформації для корегування інформації про орбіти;

- **приймальне абонентське обладнання** (сектор користувача - «супутниковий навігатор»), яке використовується для визначення місцеположення і додаткової інформації;

- **наземна система радіомаяків**, що дозволяє значно підвищити точність визначення координат (**опціонально**);
- **інформаційна радіосистема** для передачі користувачам поправок, що дозволяє значно підвищити точність визначення координат (**опціонально**).

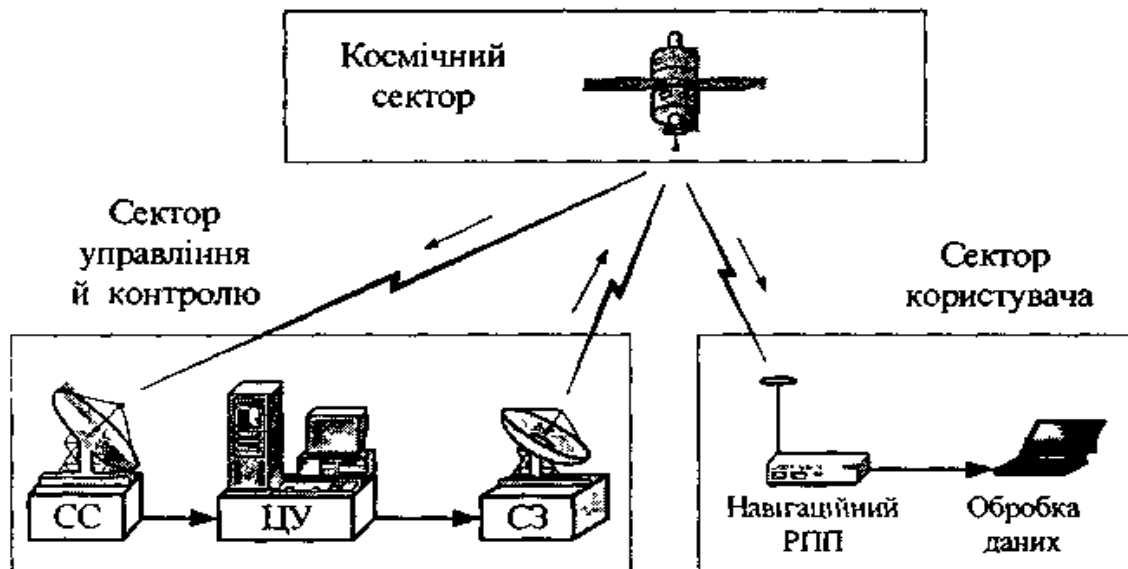


Рис. 25.1. Елементами супутникової системи навігації

(СС - станція спостереження; ЦУ - центр управління та контролю; СЗ - станція завантаження інформації на супутники; РПП - радіоприймальний пристрій)

Космічний сектор (орбітальне угруповання) складається із групи(сузір'я) штучних супутників Землі. Повне сузір'я складається із 24 супутників, їх основні параметри наведені в таблиці 25.1.

24 супутники системи, обертаються навкруги Землі по кругових орбітах на висоті близько 20 000 км. Кожний супутник робить два повні оберти менш ніж за 24 год. Супутники рухаються із швидкостями близько 11 000 км/год. Живлення супутників GPS забезпечують сонячні батареї, на борту є також резервні акумуляторні батареї. Кожний супутник має невеликі ракетні двигуни, призначені для корекції орбітальних траєкторій.

Сектор управління і контролю включає наземні станції спостереження, центр управління та контролю, станції завантаження інформації на супутники. В задачі даної підсистеми входить контроль правильності функціонування супутників, безперервне уточнення параметрів орбіт і видача на супутники тимчасових програм, команд управління і навігаційної інформації. При прольоті супутника в зоні видимості станції вимірювання, управління і контролю, вона здійснює спостереження за супутником, приймає навігаційні сигнали, проводить первинну обробку даних і здійснює обмін даними з центром управління системою. На головній станції відбувається обробка і обчислення всіх даних, які поступають від мережі управління, їх математична обробка і

обчислення координатних і корегуючих даних, що підлягають завантаженню в бортовий комп'ютер супутника.

Так *центр управління та контролю* системи *GPS* знаходиться в штаті Колорадо (США) і має у своєму складі:

- службу точного часу;
- обчислювальний комплекс;
- та засоби передачі даних на станцію завантаження інформації на супутники.

Станції спостереження розміщені порівняно рівномірно по земній поверхні поблизу екватора, що створює сприятливі умови для спостереження за супутниками, і визначають ефемериди (елементи орбіти) космічних апаратів, обчислюють їх координати, прогнозують місцезнаходження супутників у майбутньому (на декілька витків уперед), стежать за відповідністю часу на космічних апаратах загальносистемному часові, передають на супутники дані щодо стану атмосфери, який суттєво впливає на швидкість поширення радіосигналів. Необхідна інформація передається на супутники *станціями завантаження* і потім транслюється на навігаційні приймачі користувачів.

Центр управління здійснює:

- збір результатів вимірювань, виконаних супутниками;
- проводить моніторинг їх стану;
- при необхідності може коригувати положення космічних апаратів на орбіті з допомогою запасів палива, що на них знаходиться (при необхідності);
- проводити заміну несправних супутників резервними (при необхідності).

Крім цього, по отриманому від центру управління найточнішого поточного значення загальносистемного часу в кожному супутнику, при необхідності, може бути внесене відповідне коригування в роботу власного бортового годинника.

Сектор користувача - це супутникові навігаційні РПП та обладнання обробки результатів вимірювань (наприклад, ПЕОМ), яке може мати у своєму складі цифрову топографічну карту. При обробці прийнятих сигналів визначаються радіонавігаційні параметри і на їх базі - координати та складові швидкості в геодезичній системі координат, за якими відразу ж указується місцезнаходження та напрямок руху користувача на карті. Дякуючи тому, що приймальні пристрої працюють у пасивному режимі («без запиту»), допускається одночасна робота необмеженої кількості користувачів.

Основні параметри систем *NAVSTAR-GPS* та ГЛОНАСС

Таблиця 25.1

ПАРАМЕТРИ	<i>NAVSTAR- GPS</i>	ГЛОНАСС
Кількість супутників у повністю діючій системі	21+3(запасних)	21+3(запасних)
Тривалість передачі альманаху, хв.	12,5	2,5
Обсяг альманаху (для одного супутника), біт	152	149
Швидкість передачі, Біт/с	50	50
Вид модуляції	<i>BPSK</i>	<i>BPSK</i>
Число елементів коду:		
- стандартної точності	1023	511
- високої точності	2,35x10 ¹⁴	51 1000
Число орбітальних площин	6	3
Кількість супутників в одній площині	4	8
Нахил орбіт	55°	64,8°
Висота орбіт, км	20180	19130
Період обертання супутників	11 год 58 хв	11 год 15 хв
Метод поділу сигналів супутників	Кодовий	Частотний
Смуга частот діапазону L_1 , МГц	1 575,42 ± 1,023	(1602,56... 1615,5) ± 0,511
Смуга частот діапазону L_2 , МГц	1 227,6 ± 1,023	(1246,44... 1256,5) ± 0,511
Число елементів коду	1023	511
Тактова частота коду, МГц	1,023	0,511
Рівень взаємних завад між двома сусідніми каналами, дБ	мінус 21	мінус 48
Період повторення синхрокоду, с	6	2
Число символів у синхрокоді	8	30
Метод доступу в радіоканалі	<i>CDMA</i>	<i>FDMA</i>
Термін активного функціонування супутника, років	7...10	3...5

25.2. Принцип роботи системи

Нині найбільш поширеним варіантом навігаційного обладнання є навігаційні РПП супутникових систем США ***NAVSTAR-GPS*** та Росії **ГЛОНАСС**.

Принцип роботи супутникових систем навігації заснований на вимірюванні відстані від антени супутникового навігатора користувача на об'єкті, координати якого необхідно отримати, до супутників, положення яких відоме з великою точністю. Таблиця положень всіх супутників називається ***альманахом***, що представляє собою набір відомостей про поточний стан навігаційної системи в цілому, включаючи ефемериди (координати штучних супутників Землі), які використовують для пошуку

видимих супутників і вибору оптимального сузір'я із поточних відомостей. Ці данні повинен мати будь-який супутниковий абонентський приймач до початку вимірювань. Звичайно приймач зберігає альманах в пам'яті із часу останнього виключення пристрою і якщо альманах не застарілий — миттєво використовує його. Кожний супутник передає в своєму сигналі весь альманах. Таким чином, знаючи відстані до декількох супутників системи, за допомогою звичайних геометричних побудов, на основі альманаху, можна обчислити положення об'єкту в просторі.

Приймаючи інформацію від трьох супутників, РПП супутникового навігатора може визначити двомірні координати користувача (широту і довготу). "Захопивши" чотири і більш супутників, прилад може визначити тримірні координати (широту, довготу і висоту). Визначивши місцеположення користувача, приймач може обчислити такі величини як швидкість, шляховий кут, траєкторію, пройдену відстань, відстань до кінцевого пункту, час сходу і заходу сонця і багато що інше.

Метод вимірювання відстані від супутника до антени приймача заснований на визначеності швидкості розповсюдження радіохвиль. Для здійснення можливості вимірювання часу поширення радіосигналу кожний супутник навігаційної системи випромінює сигнали точного часу, використовуючи при цьому точно синхронізований із системним часом атомний годинник. При роботі супутникового приймача його годинник синхронізується із системним часом, і при подальшому прийомі сигналів обчислюється затримка між часом випромінювання, що міститься в самому сигналі, і часом прийому сигналу абонентським устаткуванням. Маючи в розпорядженні цю інформацію, навігаційний приймач обчислює координати антени. Вся решта параметрів руху (швидкість, курс, пройдена відстань) обчислюється на основі вимірювання часу, який об'єкт витратив на переміщення між двома або більшою кількістю місць з певними координатами. В реальності робота системи відбувається значно складніше.

25.3. Структура навігаційних радіосигналів

Сигнали супутника з малою потужністю (не більше 50 Вт) у вигляді псевдовипадкових кодів випромінюються на двох несучих частотах L_1 і L_2 . При цьому використовують два види кодів: один - для "грубих", другий - для "точних" вимірювань, їх періоди повторення (тривалість коду) відрізняються. Так у системі *GPS* грубий код, що називається *C/A* - кодом (англ. *Coarse Acquisition* - легко знайдений, загальнодоступний), повторюється кожен мілісекунду, а інтервал точного коду, названого *P* - кодом (англ. *Precision* - точний), складає 266,4 доби, причому його загальна тривалість розбита на тижневі відрізки, тобто цей код у кожному супутнику змінюється щотижня. Якщо *C/A* - код доступний усім користувачам, то *P* - код був спочатку вибірковим і призначався тільки

для користувачів, які мали санкціонований доступ (в основному для військових армії США).

В системі *GPS* використовується кодове розділення сигналів (*CDMA*), а супутники випромінюють сигнали на однакових частотах. Частота першого сигналу складає $L_1 = 1575,42$ МГц, а другого - $L_2 = 1227,6$ МГц. В радіосигналі використовується фазова маніпуляція (*BPSK*). Сигнал несучої частоти L_1 модулюється двома двійковими послідовностями, кожна з яких утворена шляхом підсумовування по модулю 2 відповідного далекомірного коду (*C/A* і $P(Y)$) і передаваних системних і навігаційних даних, що передаються із швидкістю 50 біт/с. На частоті L_1 передаються дві квадратурні компоненти, які біфазно - маніпульовані двійковими послідовностями. Перша послідовність є сумою по модулю 2 точного далекомірного коду P або засекреченого коду Y і навігаційних даних. Друга послідовність також є сумою по модулю 2 грубого коду *C/A* (відкритого) і вище вказаної послідовності навігаційних даних.

Радіосигнал на частоті L_2 біфазно - маніпульований тільки першою із двох раніше розглянутих послідовностей. Вибір модулюючої послідовності здійснюється по команді із Землі. Кожний супутник використовує властиві тільки йому далекомірні коди *C/A* і $P(Y)$, що і дозволяє розділяти супутникові сигнали. В процесі формування точного далекомірного $P(Y)$ коду одночасно формуються мітки часу супутникового сигналу.

Із запуском супутника *IIF* була введена нова частота $L_5 = 1176,45$ МГц. Цей сигнал також називають *safety life* (з англ. - охорона життя людини). Сигнал на частоті L_5 має більшу потужність (на 3 дБ), ніж сигнал для цивільного призначення, і випромінюється в більш широкій смузі частот. Сигнал планується використовувати в критичних ситуаціях, пов'язаних із загрозою для життя людини.

Починаючи з апаратів *IIR-M* для військових потреб використовується *M*-код, який має підвищену завадозахищеність, його достатньо (без коду *C/A*) для визначення точних координат та має можливість його передачі для конкретної локальної області з діаметром у кілька сотен кілометрів з більш високою (на 20 дБ) потужністю сигналу.

У системі ГЛОНАСС ситуація з кодами аналогічна і має відмінність лише в назвах: грубий код називається СТ-кодом (стандартної точності), а точний – ВТ-кодом (високої точності).

Але у використанні кодів системи мають суттєві відмінності: в системі *GPS* як *C/A* - код, так і $P(Y)$ - код різні для кожного супутника при однакових несучих частотах L_1 і L_2 , у ГЛОНАСС, навпаки, коди СТ і ВТ усіх космічних апаратів однакові, але їх несучі частоти відрізняються. Іншими словами, в *NAVSTAR GPS* застосований кодовий, а в ГЛОНАСС - частотний розподіл сигналів супутників.

В системі ГЛОНАСС використовується частотне розділення сигналів (*FDMA*), які випромінюються кожним супутником - двох фазо-

маніпульованих сигналів. Частота першого сигналу лежить в діапазоні $L_1 \sim 1600$ МГц, а частота другого - в діапазоні $L_2 \sim 1250$ МГц. Номінальні значення робочих частот радіосигналів, які передаються супутниками в діапазонах L_1 і L_2 , визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} L_1: & \quad f_{k1} = f_1 + k\Delta f_1 \\ L_2: & \quad f_{k2} = f_2 + k\Delta f_2, \end{aligned}$$

де $k = 1, \dots, 24$ – номери каналів робочих частот супутників;

$$\begin{aligned} f_1 &= 1602 \text{ МГц}; \Delta f_1 = 9/16 = 0,5625 \text{ МГц}; \\ f_2 &= 1246 \text{ МГц}; \Delta f_2 = 7/16 = 0,4375 \text{ МГц}. \end{aligned}$$

В супутниковий сигнал також входить *навігаційне повідомлення*, яке містить:

- мітки часу;
- дані про ефемериди супутника;
- різні поправочні величини;
- альманах (збірник даних про місцезнаходження та стан космічного апарату).

Прийом сигналів можливий лише від супутників, які знаходяться у прямій видимості.

Сигнал, який передають супутники, містить три важливих складових:

- псевдовипадковий код;
- ефемеридні дані;
- альманах.

Псевдовипадковий код містить номер супутника, що передає інформацію. Ефемеридні дані, які постійно передаються кожним супутником, містять важливу інформацію про статус супутника (робочий або неробочий), а також поточну дату і час. Ця частина сигналу необхідна для обчислення місцеположення приймачем. Альманах містить інформацію про те, де повинні знаходитися супутники. Кожний супутник передає альманах, що містить орбітальну інформацію для даного супутника, а також всієї решти супутників системи.

Обидві системи мають подвійне призначення — військове і цивільне, тому випромінюють два види сигналів: один із пониженою точністю визначення координат (~ 100 м) для цивільного застосування і інший - високої точності ($\sim 10 \dots 15$ м і точніше) для військового застосування. Для обмеження доступу до точної навігаційної інформації вводять спеціальні завади, які можуть бути враховані після отримання ключів від відповідного військового відомства (США для *GPS* і Росії для ГЛОНАСС). В даний час ці перешкоди відмінені, і точний сигнал доступний і цивільним приймачам, проте у разі відповідного рішення державних органів країн-власників військовий код може бути знову заблокований (в

системі *GPS* це обмеження було відмінено тільки у травні 2000 року і у будь-який момент може бути відновлено).

25.4. Точність вимірювання координат

На точність визначення власного місцезнаходження за допомогою супутникової навігації впливають наступні чинники:

- **іоносферні і тропосферні затримки**

Під час проходження атмосфери сигнал сповільнюється. Системи супутникової навігації використовують вбудовану модель, яка визначає середню величину затримки для часткової корекції помилки цього типу.

- **багатопроменевий прийом**

Це відбувається, коли сигнал зі супутника відбивається від об'єктів, таких як високі будівлі або скелі і потрапляє в приймач користувача. Збільшення часу проходження відбитого сигналу приводить до виникнення помилки.

- **помилка годинника приймача**

Вбудований годинник приймача користувача поступається в точності атомному годиннику, що знаходиться на борту супутників. Це може бути причиною невеликих помилок у визначенні часу проходження сигналу.

- **орбітальні помилки**

Відомі також як ефемеридні помилки, пов'язані із передачею помилкових даних про місцеположення супутників.

- **число видимих супутників**

Чим більше супутників "бачить" приймач користувача, тим вище точність. Будівлі, елементи рельєфу, а іноді і густе листя можуть перешкоджати прийому супутникових сигналів, приводячи до помилок в у визначенні місцезнаходження або взагалі до неможливості визначенні.

- **геометрія видимих супутників**

Визначається взаємним розташуванням супутників в кожний момент часу. Ідеальною є така геометрія супутників, коли кути між напрямками на них великі. Поганою вважається така геометрія, коли супутники розташовуються на одній лінії або близько до неї.

- **навмисне «загрублення» сигналу GPS**

Програма виборчої доступності (*SA-Selective Availability*) Міністерства оборони США передбачала навмисне внесення помилки в сигнал *GPS*. Метою цієї програми було запобігання можливого використання цивільних *GPS*-приймачів у військовій меті. При цьому похибка збільшується до 100 метрів.

Сучасні супутникові навігаційні РПП можуть працювати у двох **основних режимах**:

- кодових (навігаційних) вимірювань;
- фазових (геодезичних) вимірювань.

Кодові вимірювання називають також абсолютними, оскільки вони дозволяють безпосередньо визначити координати об'єкту X , Y , Z у

геоцентричній (тобто з початком у центрі мас Землі) прямокутній системі координат. При цих вимірюваннях визначається час поширення фазоманіпульованого сигналу від супутника до приймача, що включає також затримку сигналу в атмосфері та відносну поправку годинника.

Фазові вимірювання виконуються з двома РПП і являють собою відносні вимірювання, при яких визначаються не самі координати навігаційних приймачів, а різниці їх однойменних координат. Режим фазових вимірювань називають геодезичним, оскільки він забезпечує значно вищу точність, ніж навігаційний режим (на сантиметровому, а в окремих випадках і на міліметровому рівні). В цьому випадку вимірюється не час поширення сигналу від космічного апарату до РПП, а зсув фаз коливань несучої частоти за цей час.

Сучасні багатоканальні *GPS*-приймачі забезпечують достатньо високу точність. Так, 12-канальні *GPS*-приймачі *GARMIN* відстежують до 12-ти супутників *GPS* одночасно, забезпечуючи швидке та упевнене визначення місцеположення, у тому числі в міських умовах або під густими кронами дерев. На точність визначення місцеположення *GPS*-приймачем впливає розташування видимих супутників, а також ряд атмосферних і інших чинників. В середньому, точність *GPS*-приймачів для цивільного призначення складає 15 м.

Точність *GPS*-приймачів може бути підвищена шляхом прийому диференційних поправок, джерелом яких можуть бути супутникові системи диференційної корекції (англ. **SBAS** — *Space Based Augmentation System*), що передають поправку до сигналів *GPS* через геостаціонарні супутники.

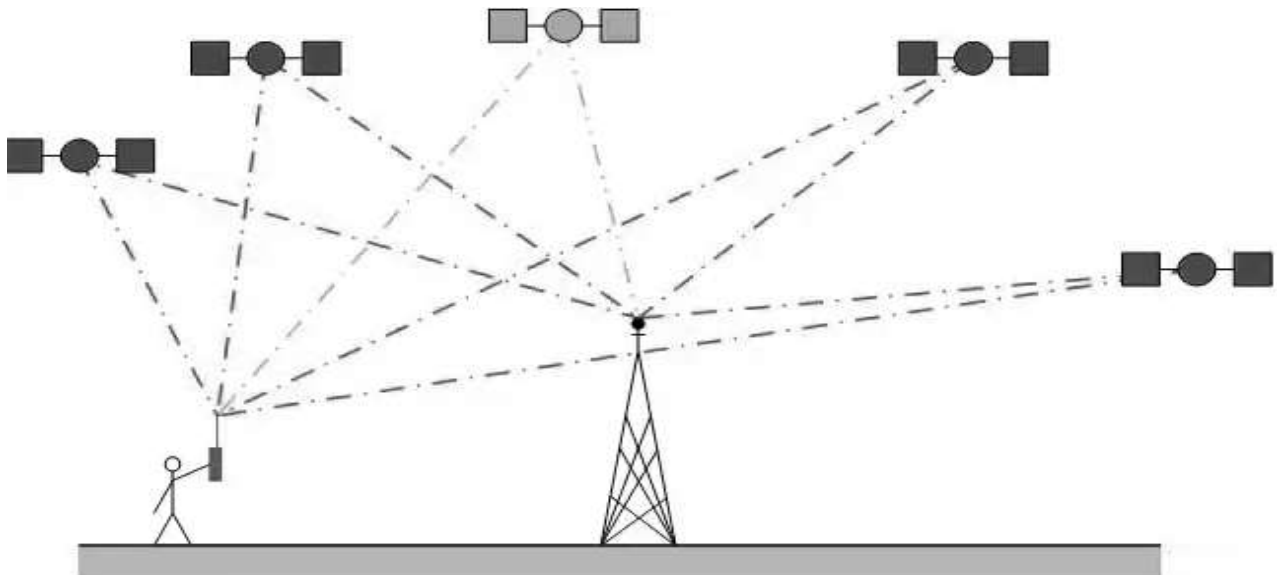


Рис.25.2. Система диференційної корекції

До основних систем відносяться: американські системи цивільної авіації *WAAS* (англ. *Wide Area Augmentation System*) та для військових потреб - *WAGE* (англ. *Wide Area GPS Enhancement*), європейська – *EGNOS* (англ. *European Geostationary Navigation Overlay Service*), для

системи ГЛОНАС – Система диференційної корекції і моніторингу. Вони покращують точність визначення місцеположення *GPS*-приймачами до 1...3 м. Такі системи можуть бути регіональними (радіус дії до 2000 км) або локальними (радіус дії до 200 км). Багато сучасних *GPS*-приймачів підтримують диференційний режим роботи.

Точність *GPS*-приймачів, встановлених на морських судах, може бути також підвищена до 1...5 м шляхом прийому диференційних поправок, які передаються мережею радіомаяків, розташованих на морському побережжі. В США ці маяки знаходяться у підпорядкуванні Служби берегової охорони. За прийом сигналів *DGPS* (*Differential GPS*) платня не стягується, проте для їх використання необхідно придбати додатковий приймач з підтримкою *DGPS* (наприклад *GARMIN GBR 21*) і підключити його до існуючого *GPS*-приймача.

25.5. Абонентське обладнання

До сегменту споживачів систем *GPS* і ГЛОНАСС відносяться приймачі сигналів із супутників.

GPS - приймач — це радіоприймальний пристрій для визначення географічних координат поточного місцеположення антени приймача на основі даних про часові затримки приймаємих радіосигналів, які випромінюються супутниками групи *NAVSTAR*.

Максимальна точність вимірювання складає 3...5 м, а за наявності корегуючого сигналу від наземної станції - приблизно 1...5 мм на 1 км відстані до наземної станції (диференціальний метод). Точність комерційних *GPS* - навігаторів складає від 150 метрів (у старих моделей при поганій видимості супутників) до 3 метрів (у нових моделей на відкритому місці). Крім того, при використуванні систем *SBAS* і місцевих систем передачі поправок точність може бути підвищений до 1...2 метрів по горизонталі.

GPS – приймачі можна поділити на:

- професійні (використовуються у військових цілях, для геодезії і картографії) (рис.25.4);
- загального користування (призначені для застосування в різних сферах сучасного життя) (рис.25.5).

Професійне *GPS* – устаткування відрізняється якістю виготовлення компонентів (особливо антен), програмним забезпеченням, підтримкою різних режимів роботи (наприклад *RTK*, *binary data output*), робочими частотами ($L_1 + L_2$), алгоритмами придушення інтерференційної залежності, сонячної активності та впливу іоносфери, можливістю роботи з різними системами навігації (наприклад *NAVSTAR-GPS*, ГЛОНАСС, *Galileo*, *Beidou*), збільшеним запасом електроживлення і відповідно ціною.

GPS – приймачі загального користування класифікуються на:

- окремі портативні пристрої (автомобільні, туристичні, спортивні);

- вбудовані в інші пристрої як функціональний вузол (в КПК, смартфон, ноутбук тощо);
- *GPS*-трекери, *GPS*-логери, які ведуть запис і передачу координат на серверний центр і використовуються для супутникового моніторингу автомобілів, людей, об'єктів.

Перший тип пристроїв мають особистий процесор, другий – тільки *GPS*-чіпсет та призначені під конкретну операційну систему.

Як правило типовий приймач складається з наступних основних функціональних частин (рис.25.3):

- антени;
- радіочастотної частини;
- цифрового корелятора;
- процесора;
- інтерфейсу користувача – дисплей.

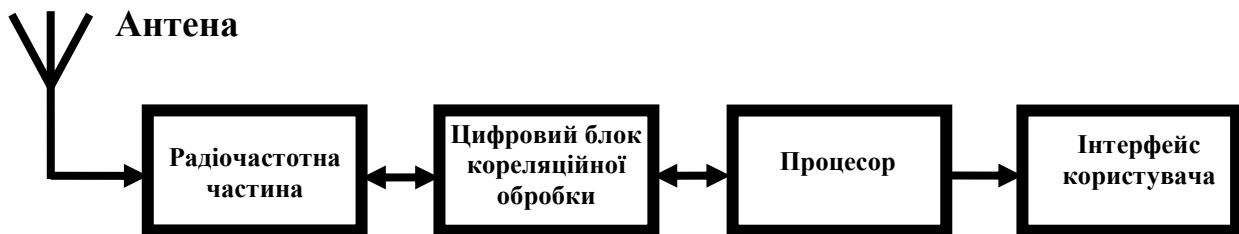


Рис. 25.3. Структура типового приймача супутникової навігаційної системи

Додатковими елементами є пам'ять, система живлення та керування, різні інтерфейси.

З виходу антенно-фідерного пристрою (антени) сигнал поступає на радіочастотну частину. Основні задачі цієї частини полягають у посиленні вхідного сигналу, фільтрації (селекції), перетворенні частоти і аналого-цифровому перетворенні. Крім цього, із радіочастотної частини приймача поступає тактова частота для цифрової частини приймача. З виходу радіочастотної частини цифрові відліки вхідного сигналу поступають на вхід цифрового корелятора.

В кореляторі спектр сигналу переноситься на «нульову частоту». Це проводиться шляхом перемноження вхідного сигналу корелятора із опорним гармонійним коливанням у синфазному і квадратурному каналах. Далі результат проходить кореляційну обробку шляхом перемноження з опорним далекомірним кодом і накопиченням на періоді далекомірного коду. Крім того, в деяких приймачах корелятор формує необхідні вимірювання опорних сигналів і передає їх в процесор для подальшої обробки. В той же час, оскільки опорні сигнали в кореляторі формуються по управляючих кодах, що поступають з процесора, то необхідні вимірювання опорних сигналів можна проводити безпосередньо в процесорі, обробляючи відповідним чином управляючі коди, що і робиться в багатьох сучасних приймачах.

Крім власних географічних координат (широти, довготи і висоти) сучасний *GPS*-приймач здатний повідомити:

- точний час (деякі приймачі мають вихід *PPS*);
- орієнтацію по сторонах горизонту (в моделях без вбудованого компасу – тільки напрям переміщення при русі);
- висоту над рівнем моря (за умови прийому сигналу більше чотирьох супутників або за наявності вбудованого баровисотоміру);
- напрям на місце з координатами, які задаються користувачем;
- поточну швидкість, середню швидкість, пройдену відстань;
- дані з інформацією про стан дороги — пробки, дорожні роботи тощо (в моделях, які оснащені спеціальним приймачем і за наявності відповідної служби);
- поточне положення на електронній карті місцевості (моделі, що оснащені відповідними картами).

Основними виробниками професійних приймачів супутникової навігації є: *Ashtech*, *Javad*, *Leica*, *NovAtel*, *Trimble*, *Topcon*, *Sokkia*, *Septentrio*, МКБ «Компас», ВАТ «РІРВ», ВАТ «НИИ КП».



Рис.25.4. Професійний *GPS*-приймач

Основними виробниками *GPS*-приймачів загального користування є: *Garmin*, *GlobalSat*, *GlobusGPS*, *iBlue*, *Novacom Wireless*, *JJ-Connect*, *Holux*, *Magellan*, *Mitac*, *Navigon*, *Qstarz*, *ThinkWare*.

Питання самоконтролю до VI розділу

1. За яким принципом працює супутникова система навігації?
2. Які системи супутникової навігації Вам відомі?
3. В чому різниця систем *NAVSTAR-GPS* та ГЛОНАСС.
4. Із яких елементів складається супутникова система навігації та яке їх призначення?
5. Які дані містить альманах?
6. Для чого використовують різні несучі частоти для передачі сигналів зі супутників?
7. Як формуються несучі частоти L_1 та L_2 в системі ГЛОНАСС?
8. Що містить супутниковий сигнал?
9. Що впливає на точність визначення координат?
10. В чому особливість режимів кодових і фазових вимірювань?
11. Для чого призначена системи диференційної корекції?
12. Із яких елементів складається приймач супутникової системи навігації?

ЛІТЕРАТУРА

1. Головін Ю.О. Системи радіозв'язку з рухомими об'єктами : навч. посіб. Київ.: ВІТІ НТУУ КПІ, 2011. 313с.
2. Климаш М.М., Пелішок В.О., Михайленіч П.М. Технології мобільного зв'язку : навч. посіб. Львів, 2007. 615 с.
3. В.Г. Карташевский, С.Н. Семенов, Т.В. Фирстова. Сети подвижной связи. Москва : Эко-Трендз, 2001. 302 с.
4. Вильям Столлингс. Беспроводные линии связи и сети / пер. с англ. Москва : Издательский дом "Вильямс", 2003. 640 с.
5. В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев. Сети и системы радиодоступа. Москва : Эко-Трендз, 2005. 384 с.
6. С.В. Гордейчик, В.В. Дубровин. Безопасность беспроводных сетей. Москва : Горячая линия-Телеком, 2008. 288 с.
7. Весоловский Кшиштоф. Системы подвижной радиосвязи / пер. с польск. И.Д. Рудинского под ред. А.И. Дедовского. Москва : Горячая линия-Телеком, 2006. 536с.
8. Катунин Г.П., Мамчев Г.В., Попантонопуло В.Н., Шувалов В.П. Телекоммуникационные системы и сети. Том 2. Москва : Горячая линия - Телеком, 2004. 672 с.
9. Карташевский В.Г., Семёнов С.Н., Фирстова Т.В. Сети подвижной связи. Москва: Эко-Трендз, 2001. 299 с.
10. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. Москва : Эко-Трендз, 2000. 239 с.
11. Соловьёв А.А., Смирнов С.И. Техническая энциклопедия пейджинговой связи. Москва : Эко-Трендз, 1998. 169 с.
12. Девис Джон, Карр Джо Карманный справочник радиоинженера. Москва : Издательский дом «Додэка – XXI», 2002. 544с.
13. Григорьев В.А. и др. Сети и системы радиодоступа. Москва : Эко-Трендз, 2005. 384
14. Закиров З.Г. и др. Сотовая связь стандарта GSM. Москва : Эко-Трендз, 2004. 264 с.
15. Чекалин АА. и др. Защита информации в системах мобильной связи : учебное пособие для вузов. Москва : Горячая линия-Телеком, 2005. 171 с.
16. Г.В. Конахович, В.П. Климчук, С.М. Паук, В.Г. Потапов. Защита информации в телекоммуникационных системах. Киев : "МК-Пресс", 2005. 288с.
17. <http://uk.wikipedia.org>.
18. <http://www.intuit.ru>.
19. <http://book.itep.ru>.
20. <http://www.wimaxforum.org>.