Міністерство транспорту та зв'язку України
Державний департамент з питань зв'язку та інформатизації

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

Кафедра технічної електродинаміки та систем радіозв'язку

Бойко М.П.

СИСТЕМИ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Конспект лекцій для студентів,
що навчаються за напрямом «Телекомунікації»

ЗАТВЕРДЖЕНО
методичною радою академії
протокол № 8
від 09.03.2004 р.

Одеса 2004

УДК 621.396.93

Бойко М.П.

Системи стільникового зв’язку: Конспект лекцій. – Одеса: ОНАЗ, 2004 – 76 с.

Конспект лекцій містить основні принципи побудови сучасних стільникових систем зв’язку. Його зміст відповідає програмі предмету "Системи зв’язку з рухомими об’єктами".

Наведені основні характеристики сучасних систем стільникового зв’язку різних стандартів, порівняння їх технічних можливостей та економічних показників, а також засоби та методи, що забезпечують реалізацію цих характеристик і показників.

Розглянуті деякі питання функціонування та реалізації елементів систем стільникового зв’язку та створення мережі зв’язку з рухомими об’єктами.

УХВАЛЕНО
на засіданні кафедри технічної електродинаміки та систем радіозв’язку і рекомендовано до друку.
Протокол № 5
від 24.01.2005 р.

ЗМІСТ

Перелік використаних скорочень ……..…….…….….4
1 Історія розвитку стільникових систем зв'язку у світі та в Україні…….6
2 Технічні параметри системи зв'язку стандарту GSM……..……...…11
3 Структура кадру та формування каналів……..……..……..…15
4 Основи побудови мережі стільникового зв'язку…….……....20
5 Структура обладнання мереж стільникового зв'язку.....…….....25
6 Обладнання мережі……....31
7 Методика розрахунку стільникової мережі……...……...….35
8 Принципи побудови систем зв'язку з кодовим
поділом каналів (CDMA)……...…….……...….41
9 Переваги та недоліки систем зв'язку стандарту CDMA……..…….....48
10 Послуги в мережах зв'язку стандарту CDMA та
перспективи розвитку таких мереж……..59
11 Обладнання мережі СМРЗ стандарту CDMA, його функції
та місце розташування……..….....62
12 Організація зв'язку між базовими станціями та
контролером базових станцій……....69
Література……..……...…….……....74

Перелік використаних скорочень

Англомовні скорочення

AUC	(Authentification Center)	- центр автентифікації
BSC	(Base Station Controller)	- контролер базових станцій, КБС
BSS	(Base Station System)	- підсистема базових станцій
BTS	(Base Transceiver Station)	- базова приймально-передавальна станція
CCH	(Control Channels)	- канали керування, КК
CEPT	(Conference of European Postal and Telecommunications Operators)	- Європейська конференція адміністрацій пошт та зв'язку
CKSN	(Ciphering Key Sequence Number)	- номер ключової послідовності шифрування
CMC	(Ciphering Mode Command)	- команда на перехід у режим шифрування
DTX	(Discontinous Transmission)	- система переривчастого передавання мови
EC	(Echo Canceller)	- лунопридушувач
EI	(Equipment Identification Register)	- регістр ідентифікації обладнання
GMSC	(Gateway Mobile Services Switching Center)	- міжмережний центр комутації рухомого зв'язку
GSMK	(Gaussian Minimum Shift Keying)	- гауссівська частотна маніпуляція без розривання фази
HRL	(Home Location Register)	- регістр місцезнаходження домашніх абонентів
IMEI	(International Mobile Station Equipment Identity)	- міжнародний ідентифікаційний номер рухомої станції
IMSI	(International Mobile Subscriber Identity)	- міжнародний ідентифікаційний номер абонента
ISDN	(Integrated Services Digital Network)	- цифрова мережа з інтеграцією служб
IWF	(Interworking Function)	- міжмережний функціональний стик
LPC	(Linear Predictive Code)	- лінійне кодування з пророкуванням
MS	(Mobile Station)	- рухома станція, РС
MSC	(Mobile Switching Centre)	- центр комутації рухомого зв'язку, ЦК

MSRN	(Mobile Station Roaming Number)	- номер "блукаючої" рухомої станції
MTP	(Message Transfer Part)	- підсистеми передачі повідомлень
NMC	(Network Management Centre)	- центр керування мережею, ЦКМ
OMC	(Operations and Maintenance Centre)	- центр керування та обслуговування
PDN	(Packet Data Network)	- мережа пакетного передавання даних
PIN	(Personal Identification Number)	- персональний ідентифікаційний номер
PSTN	(Public Switched Telephone Network)	- телефонна мережа загального користування
RSA	(Rivest, Shamir, Adleman)	- алгоритм шифрування з відкритим ключем
SCCP	(Signalling Connection Control Part)	- підсистема управління з’єднуванням сигналізації
SI	(Subscriber Identity Module)	- модуль ідентифікації абонента (SIM-карта)
TCH	(Traffic Channel)	- канал навантаження
TDMA	(Time Division Multiply Access)	- багатостанційний доступ з часовим поділом каналів
TUP	(Telephone User Part)	- підсистема користувачів телефонною мережею
VLR	(Visited Location Register)	- регістр місцезнаходження гостьових абонентів
WS	(Work Station)	- робоча станція

Українські скорочення

БС	– базова станція
КБС	– контролер базових станцій
РРС	– радіорелейна станція
СМРЗ	– стільникова мережа рухомого зв’язку
ССРР	– система стільникового рухомого радіозв’язку
ЦКСМ	– центр комутації стільникової мережі

1 ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ СТІЛЬНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ

Появі мереж стільникового зв'язку з рухомими (мобільними) об'єктами передував довгий період еволюційного розвитку радіотелефонної системи зв'язку, у плині якого освоювалися різноманітні частотні діапазони й удосконалювалась техніка зв'язку. Ідея стільникового зв'язку була запропонована у відповідь на необхідність розвитку широкої мережі рухомого зв'язку в умовах обмежень на доступні смуги частот.

В середині 40-х років XX століття дослідницький центр Bell Labs американської компанії AT&T запропонував ідею розбиття території, що обслуговується, на невеликі ділянки, які стали називатися чарунками, а система зв'язку – стільниковою (cell – комірка, стільник). Кожна чарунка повинна була обслуговуватися передавачем з обмеженим радіусом дії та фіксованою частотою. Це дозволило б без взаємних завад використовувати ту ж саму частоту повторно в іншій чарунці. Але минуло близько 30 років, перш ніж такий принцип організації зв'язку був реалізований на апаратному рівні.

У 70-х роках почалися роботи по створенню єдиного стандарту стільникового зв'язку для п'яти північноєвропейських країн – Швеції, Фінляндії, Ісландії, Данії та Норвегії, який одержав назву NMT-450 (Nordic Mobile Telephone) та призначався для роботи у діапазоні 450 МГц. Експлуатація перших систем стільникового зв'язку цього стандарту почалась у 1981 р. Мережі на основі стандарту NMT-450 та його модифікованих версій стали широко використовуватися в Австрії, Голландії, Бельгії, Швейцарії, а також в країнах Південно-Східної Азії та Близького Сходу. На базі цього стандарту в 1985 р. був розроблений стандарт NMT-900 діапазону 900 МГц, який дозволив розширити функціональні можливості та значно збільшити абонентську ємність системи.

У 1983 р. в США стала експлуатуватися мережа стандарту AMPS (Advanced Mobile Phone Service). Цей стандарт був розроблений у дослідницькому центрі Bell Laboratories.

У 1985 р. у Великобританії був прийнятий як національний стандарт TACS (Total Access Communications System), розроблений на основі американського стандарту AMPS. У 1987 р. була розширена його робоча смуга частот. Нова версія цього стандарту отримала назву ETACS (Enhanced TACS). У Франції в 1985 р. був прийнятий стандарт Radiocom-2000.

Наприкінці 80-х років усі провідні виробники обладнання стільникового зв'язку почали створювати системи стільникового зв'язку, основані на цифрових методах обробки сигналів. З метою розробки єдиного європейського стандарту цифрового стільникового зв'язку у виділеному для цих цілей діапазоні 900 МГц у 1982 р. Європейська Конференція Адміністр-

рацій Пошт та Електрозв'язку створила спеціальну групу Groupe Special Mobile. Абревіатура GSM дала назву новому стандарту (пізніше GSM стали розшифровувати як Global System for Mobile Communications). Результатом роботи цієї групи були опубліковані у 1990 р. вимоги до систем стільникового зв'язку стандарту GSM.

У США в 1990 р. американська Промислова Асоціація в галузі зв'язку TIA (Telecommunications Industry Association) затвердила національний стандарт IS-54 цифрового стільникового зв'язку. Цей стандарт більш відомий під абревіатурою D-AMPS або ADC. На відміну від Європи, у США не були виділені нові частотні діапазони, тому система повинна була працювати в смузі частот, спільній зі звичайним AMPS. У той самий час американська компанія Qualcomm почала розробку нового стандарту стільникового зв'язку, заснованого на технології шумоподібних сигналів та кодовому поділі каналів – CDMA (Code Division Multiple Access).

У 1991 р. в Європі з'явився стандарт DCS-1800 (Digital Cellular System 1800 МГц), створений на базі стандарту GSM.

В Японії був розроблений власний стандарт стільникового зв'язку JDC (Japanese Digital Cellular), близький за своїми показниками до стандарту D-AMPS. Стандарт JDC був затверджений у 1991 р. Міністерством Пошт та Зв'язку Японії.

У 1993 р. у США Промислова Асоціація в галузі зв'язку TIA прийняла стандарт CDMA як внутрішній стандарт цифрового стільникового зв'язку, що одержав назву IS-95. У вересні 1995 р. у Гонконгу була відкрита комерційна експлуатація першої мережі стандарту IS-95.

У 1993 р. у Великобританії вступила в експлуатацію перша мережа DCS-1800 One-2-One.

У вересні 1995 року у Гонконгу Hutchison створив першу у світі комерційну мережу CDMA, використовуючи базове обладнання компанії Motorola і мобільні телефони Qualcomm. Сьогодні ця мережа, що складається усього зі 113 чарунок і працює тільки на одному каналі зі смугою в 1,23 МГц, обслуговує понад 40 000 абонентів. Причому чарунки CDMA були накладені на існуючу мережу AMPS. Система зв'язку стандарту CDMA працює набагато надійніше, ніж її попередниця, незважаючи на значно більший трафік у мережі. Через гористий ландшафт, оточення водою, безліч тунелів і жорстку конкуренцію між сьома провайдерами, Гонконг розглядається як надзвичайно проблемний ринок. За словами Генрі Вонга, головного інженера компанії Hutchison, "CDMA вимагає кількість чарунок на тридцять - сорок відсотків менше, ніж GSM, щоб обслуговувати ту саму територію, включаючи усі низовини і височини Гонконгу, десять станцій метро, тунелі навколо міста і Коулунський півострів".

У Кореї працювати у стандарті CDMA почали дві компанії. Перша, Korea Mobile Telecom (KMT), почала функціонувати наприкінці другого тисячоліття. Так само, як Hutchison у Гонконгу, KMT наклала CDMA (ви-

користовуючи базове обладнання Goldstar) на вже існуючу аналогову мережу. Розраховуючи на приплив клієнтів, що збільшується, KMT продовжує розширювати свою мережу, яка охоплює 95 відсотків абонентів мереж зв’язку з рухомими об’єктами Кореї.

У той самий час Shinsengi Telecom також почала створювати мережу на основі CDMA, використовуючи базове обладнання Samsung і телефони декількох компаній, таких як Sony і Qualcomm, орієнтовану, в основному, на провінції країни.

Разом ці дві компанії обслуговують вже понад 200 000 клієнтів - і щодня реєструють понад 2 000 нових.

CDMA зайняла у Північній Америці - найбільшому ринку послуг мобільного зв’язку, майже 90 відсотків мереж.

В Україні за підсумками першого кварталу 2003 р. послугами мобільного зв’язку користувалось близько 3,9 млн. абонентів, що на 55% перевищило рівень аналогічного періоду попереднього року.

На початок 2004 року мобільним зв’язком в Україні користувалися більш ніж 5 млн. чоловік (10% населення країни). За словами генерального директора оператора мобільного зв’язку СП "Український мобільний зв’язок" (UMC) Еріка Франке, за 2003 рік приріст був такий же, як і в 2002 році, – близько 1,4 млн. абонентів. Протягом двох останніх років кількість користувачів мобільним зв’язком щорічно зростає приблизно на 1,4 млн. чоловік: у 2001 році спостерігалося зростання в 2,6 рази – до 2,25 млн. абонентів, у 2002-му – на 65% - до 3,63 млн.

Таке різке розширення мереж, зрозуміло, приносить операторам чимало технічних проблем. Черги в пунктах підключення, сигнали „зайнято” на лініях сервісу, скарги на якість зв’язку, а також „падіння” мережі стали для швидко зростаючих операторів нерідким явищем. В умовах обмеженої кількості каналів на частотах 900 МГц, два національних оператора мобільного зв’язку змушені були в останні роки освоювати нові частоти в діапазоні 1800 МГц та залучати додаткові інвестиції. Подібна ситуація буде спостерігатися і в майбутньому. Наприклад, „Київстар” у 2002 році освоїв $120 – 180 млн., що складає більш ніж половину всіх інвестицій компанії за попередні роки.

У грудні 2002 року доходи операторів України від мобільного стільникового зв’язку збільшилися на 7,9% порівняно з листопадом і досягли 267,028 млн. грн. Про це говориться в повідомленні Державного комітету статистики.

Слід зазначити, що забезпечення стаціонарними телефонами в Україні на одну людину становить 21/100, на родину – 54/100 (у розвинених країнах – відповідно 55 – 70/100 та 90 – 100/100), а середній час очікувань установки телефону – 5,1 року. Це, звичайно не найкращий стан справ. Проте саме цей факт багато в чому визначає успіх і бурхливий розвиток стільникового зв’язку. Так, у 2000 році було продано близько 500 тис. сті-

льникових телефонів (за попередні три роки в цілому – всього близько 360 тис.) І сьогодні багато фахівців вважають, що попереду – величезні можливості для зростання як кількості користувачів послугами зв’язку, так і підвищення якості останніх, оскільки загострюється конкурентна боротьба між операторами, що безпосередньо надають послуги зв’язку, а також між ділерами, які продають споживачам стільникові термінали (телефони).

Сьогодні в Україні реально діють 6 операторів стільникового зв’язку, серед яких і поділені ті 5 млн. споживачів послуг. Два з них - UMC і "Київстар" – контролюють більш ніж 90% українського ринку мобільного зв’язку.

Компанія UMC (Українські мобільні телекомунікації) – це перший і один з найбільш великих операторів мобільного зв’язку в Україні. Компанія надає послуги GSM 900/1800 і NMT-450i в діапазонах 450, 900 і 1800 МГц. Мобільна мережа компанії покриває більш ніж 300 великих і малих міст України. Мережа UMC покриває половину території країни, на якій мешкає 80% її населення. Понад 75% абонентів UMC користуються послугами з передоплатою. Компанія активно розширює асортимент послуг і розвиває систему роумінгу. На сьогодні UMC уклала угоди про роумінг із 187 операторами GSM і 6 операторами NMT з 86 країн.

Інший великий оператор мобільного зв’язку - "Київстар", працює у стандарті GSM 900/1800. Мережа компанії трохи поступається покриттям мережі компанії UMC. Це має свої причини, а саме те, що компанія "Київстар" була заснована у 1998 р., тобто значно пізніше, ніж UMC, яка була заснована у 1993 р. Проте мережа компанії покриває усі обласні та районні центри України, і постійно розвивається.

За інформацією компанії "Українські радіосистеми", його абонентами є близько 50 тис. чоловік. Компанія надає послуги мобільного зв’язку під торговою маркою Wellcom у Києві в стандарті GSM 900. У січні 2003 року змінився склад засновників компанії "Українські радіосистеми", що, на думку експертів ринку, може привести до швидкого розвитку компанії.

Кількість абонентів компанії "Голден Телеком" зараз складає 60 тис. абонентів. Компанія надає послуги стільникового зв’язку стандарту GSM 1800 у Києві й Одесі.

Ще один український оператор – компанія "Цифровий стільниковий зв’язок України", що надає послуги під торговою маркою DCC, має дозвіл на використання радіочастот у стандарті DAMPS. Відомості про кількість абонентів компанія не розголошує. Рік назад її послугами користувалися 80000 абонентів.

У табл. 1.1 показана динаміка нарощування операторами абонентської бази за минулі роки, а стан на середину 2003 року показано на рис. 1.1. Інформація про кількість абонентів компанії DCC за поточний період не точна з причин нерозголошення ними цих даних.

Таблиця 1.1 – Динаміка нарощування операторами абонентської бази

Компанія	Кількість абонентів, тис.		
	березень 2002	грудень 2002	березень 2003
UMC	1163	1700	1815
Київстар GSM	1298	1856	2000
Wellcom	33	37	37
Голден Телеком	43	42	41
DCC	80	80	80
Сума	**2617**	**3715**	**3973**

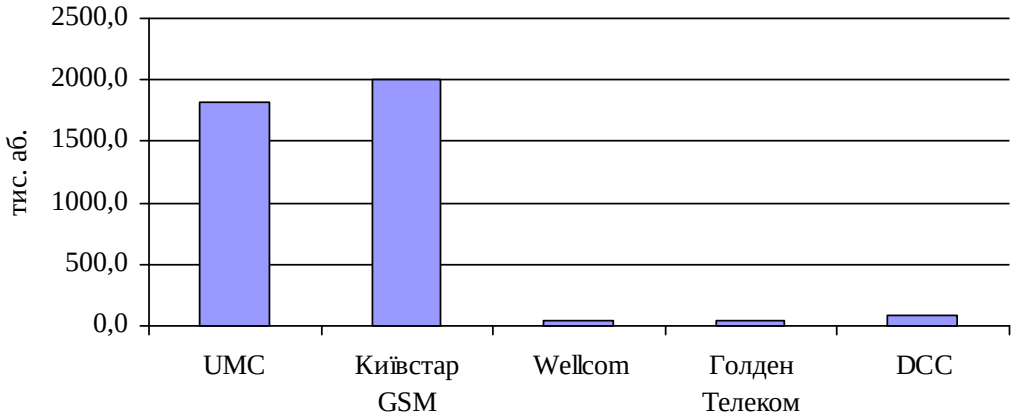

Рисунок 1.1. – Абонентська база операторів стільникового зв'язку України

Однак слід врахувати, що у своїх звітах (це стосується майже усіх операторів), компанії частіше показують кількість не поточних абонентів, а тих, хто підключився до оператора протягом його присутності на ринку, тому можна стверджувати, що реально користуються послугами мобільного зв'язку у півтора рази менше людей, ніж це значиться у підрахунках операторів сумарної кількості абонентів.

2 ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ GSM

Відповідно до рекомендації СЕРТ 1980 р., яка стосується використання спектра частот для потреб рухомого зв'язку в діапазоні частот 862-960 МГц, стандарт GSM передбачає роботу передавачів у двох діапазонах частот: 890-915 МГц (рухомих станцій), 935-960 МГц (базових станцій).

У стандарті GSM використовується вузькосмуговий багатостанційний доступ з часовим поділом каналів (NB TDMA). У структурі TDMA кадру міститься вісім часових позицій на кожній зі 124 носійних частот.

Для боротьби з інтерференційними завмираннями прийнятих сигналів, що викликано багатопроменевим поширенням радіохвиль в умовах міста, в апаратурі зв'язку використовуються еквалайзери, які забезпечують вирівнювання імпульсних сигналів з середньоквадратичним відхиленням часу затримки до 16 мкс.

Система синхронізації розрахована на компенсацію затримки сигналів до 233 мкс, що відповідає максимальній дальності зв'язку або максимальному радіусу чарунки 35 км.

Для захисту від помилок в радіоканалах при передаванні повідомлень застосовується блокове та згорткове кодування з перемеженням. Підвищення ефективності кодування та перемеження за малої швидкості переміщення рухомих станцій досягається повільним переключенням робочих частот (SFH) упродовж сеансу зв'язку зі швидкістю 217 стрибків за секунду.

Типову схему стільникової мережі рухомого зв'язку (СМРЗ) стандарту GSM-900 зображено на рис. 2.1, на якій MSC (Mobile Switching Center) – центр комутації стільникової мережі (ЦКСМ), BTS (Base Transceiver Center) – базові станції (БС), BSC (Base Station Controller) – контролери базових станцій (КБС), OMC (Operation and Maintenance Center) – центр управління та експлуатації, а також служби обміну мовними повідомленнями VMS (Voice Messaging Center) та коротких (циркулярних та індивідуальних) повідомлень SMS (Short Messaging Service). Функції MSC та OMC здійснюють цифрові системи комутації 5ESS та EWSD за умови їх апаратного та програмного дообладнання. Зокрема, кожен MSC, повинен мати регістр візитних абонентів (VLR – Visitor Location Register), а також власний чи спільний для кількох MSC центр автентифікації рухомих абонентів (AUC – AUthentication Center) і регістр власних абонентів (HLR – Home Location Register) та ідентифікації обладнання рухомих станцій (EIR – Equipment Identity Register). Вказані регістри і центр автентифікації являють собою спеціалізовані комп'ютерні бази даних.

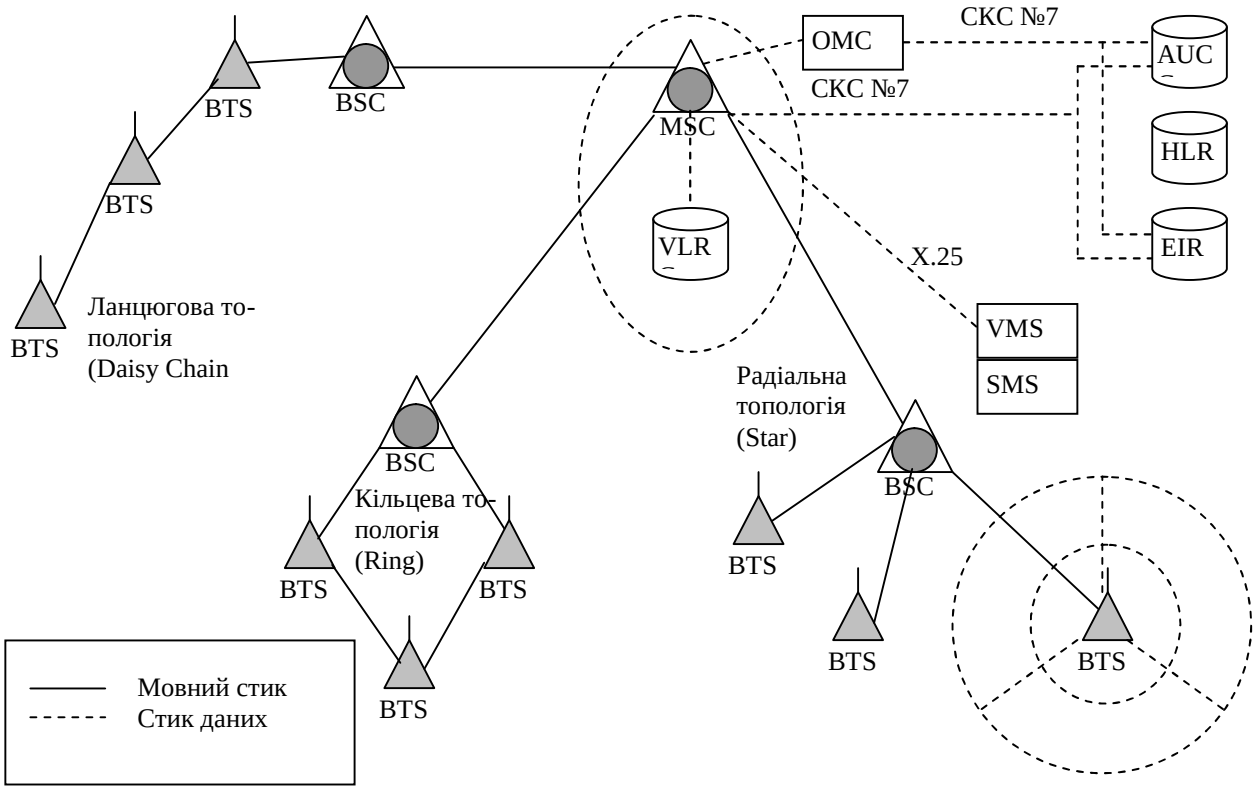

Рисунок 2.1 – Типова структура СМРЗ стандарту GSM-900

Регістр HLR містить дані для установлення вхідних з'єднань до *"своїх"* абонентів: статус кожного абонента (дозволені послуги тощо) і зону його поточного місцезнаходження (координати відповідного VLR). Регістр VLR зберігає інформацію про *"своїх"* та *"чужих"* рухомих абонентів, присутніх у зоні обслуговування даного MSC. Коли РС пересувається у зоні MSC, вона фіксується у VLR, який відповідно інформує HLR про цю РС, звідти РС отримує статус абонента та його автентифікаційні дані: міжнародний номер (IMSI – International Mobile Station Identity) та персональний код *(*PIN – Personal Identification Number). Останній генерує і надає HLR відповідний AUC. Регістр EIR зберігає детальну інформацію для ідентифікування кожної РС та перевірки відповідності її параметрів номіналам. Завдяки EIR дефектне або не ідентифіковане обладнання не допускається до обслуговування. Зазначимо, що центр комутації MSC є "шлюзом" між СМРЗ та іншими мережами, наприклад, ТфМСК, мережами передачі даних тощо.

Функціональне спряження елементів системи здійснюється низкою інтерфейсів. Усі мережні функціональні компоненти в стандарті GSM взаємодіють відповідно до системи сигналізації МСЕ-Т (раніше МККТТ) SS N 7 (CCITT SS. N 7).

Особливістю мережі стандарту GSM є об'єднання BTS у систему базових станцій (BSS – Base Station System), де ці BTS з'єднуються з контро-

лером BSC із використанням радіальної, кільцевої чи деревовидної топології. Окрема BTS обслуговує від 1 до 6 чарунок за рахунок секторних антен та накладання чарунок різного діаметра (на рис. 2.1 зона обслуговування виділена лише для однієї з базових станцій), та здійснює контроль за спрощеною комутаційною станцією, яка забезпечує взаємні з'єднання сусідніх РС та установлення інших з'єднань через MSC. Взаємодіють BSC, MSC та РС між собою за допомогою спільних каналів сигналізації SS №7. У напрямках до ТфМСК можливі практично всі прийняті останні методи та системи сигналізації.

Служба VMS надає РС послуги електронної мовної поштової скриньки. У ситуаціях, коли неможливо отримати зв'язок з потрібною РС, можна занести до її "скриньки" мовне повідомлення, при цьому передбачена індикація на радіотелефоні наявності повідомлення та проста процедура його прослуховування.

Служба SMS дозволяє адміністрації та самим РС передавати окремим РС або одночасно всім РС у межах чарунки короткі літерно-цифрові повідомлення, що висвічуються на міні дисплеї РС та надають РС додаткову інформацію.

Більшість провідних фірм-розробників комутаційної техніки пристосували свої цифрові системи комутації до вимог стандарту GSM-900, що дозволяє утворювати мережу (рис. 2.1) на базі відповідних ЦСК (EWSD, 1000E10, 5ESS тощо).

Конкретні центри комутації (ЦК) стандарту GSM-900 (D-900 на базі EWSD, Alcatel-900 на базі 1000E10, INTELLOVERCE Wireless System на базі 5ESS) дуже подібні і цілком сумісні.

Розглянемо детальніше технічні характеристики цифрових стільникових систем мобільного зв'язку на прикладі стандарту GSM та близького до нього DCS-1800. На рис. 2.2 показана послідовність обробки мовного сигналу у РС. Перетворення мови здійснює мовний кодер вокодерного типу із регулярним імпульсним збудженням та довгостроковим завбаченням. Швидкість перетворення становить 13 кбіт/с, що відповідає розташуванню 260 бітів на часовому сегменті 20 мс. Канальний кодер підвищує завадостійкість внесенням надлишковості та збільшенням швидкості передавання. Перед кодуванням блок із 260 бітів поділяється на дві групи: 182 більш значущих бітів відносяться до першого класу й подаються на згортковий кодер з коефіцієнтом 1/2, а 78 бітів, що залишились (клас 2), передаються без кодового захисту. У цілому це дає 456 бітів на сегменті 20 мс, тобто сукупну швидкість 22,8 кбіт/с. Далі цифрову послідовність обробляє перемежувач, завдяки чому для приймача БС кожний пакет помилок перетворюється у відповідну кількість окремих помилок. Після перемежувача формується інформаційний кадр (так званий TDMA-кадр), імпульсна послідовність надходить на передмодуляційний гауссівський фільтр і потім на частотний модулятор передавача РС.

Передавачі РС випромінюють у діапазоні 890...915 МГц, а передавачі БС – 935...960 МГц. У кожній з цих двох смуг по 25 МГц виділено по 124 носійних частоти, що утворює 124 дуплексних канали зі смугою 200 кГц кожний та рознесенням частот у 45 МГц. Окремій чарунці мережі надається від 1 до 15 таких дуплексних частотних каналів. У структурі TDMA-кадру на кожній носійній частоті утворюється 8 часових позицій (вікон). Певний фізичний канал використовує однойменне часове вікно у послідовності TDMA-кадрів. Таким чином, загальна кількість фізичних каналів становить 124 × 8 = 992. Передавані повідомлення та дані, перетворені у цифрову форму, ще до формування фізичних каналів групуються та об’єднуються у так звані логічні канали. У стандарті GSM існує 11 типів логічних каналів: два канали навантаження TCH (Traffic CHannel) для кодованої мови та даних і дев’ять каналів керування CCH (Control CHannel) для керування та сигналізації. У фізичному каналі може міститись декілька логічних.

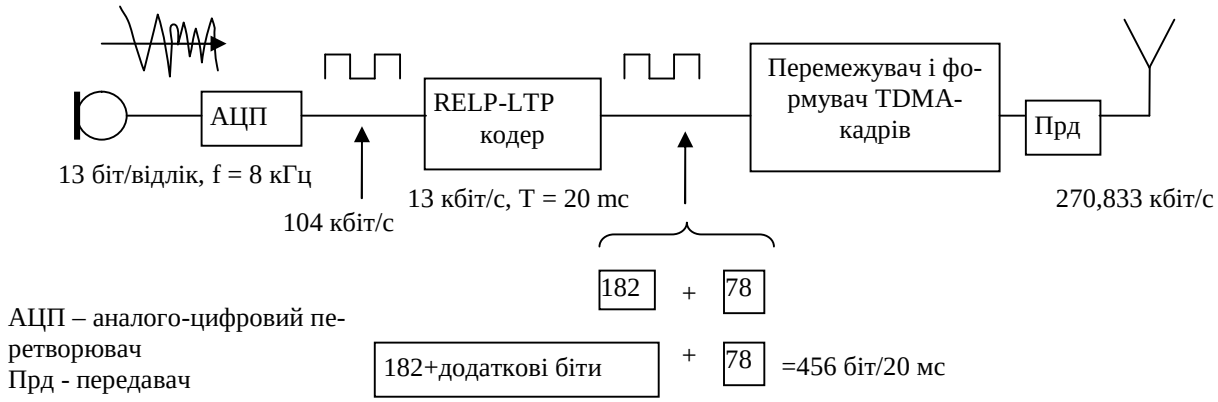

Рисунок 2.2 – Послідовність обробки мовного сигналу

3 СТРУКТУРА КАДРУ ТА ФОРМУВАННЯ КАНАЛІВ

Структура часових кадрів наведена на рис. 3.1.

Тривалість найдовшого інтервалу, названого гіперкадром, $T_г$ = 3 г 28 хв 53,76 с. Він поділяється на 2048 суперкадрів тривалістю $T_с$ = 6,12 с кожен. Суперкадр містить 51 мультикадр, кожен з яких складається з 26 TDMA-кадрів і триває $T_{щ}$ = 6120/51 = 120 мс, або ж містить 26 мультикадрів по 51 TDMA-кадру та із $T_м$ = 6120/26 = 253,385 мс. Окремий TDMA-кадр в обох випадках триває $T_к \approx$ 4,615 мс. У гіперкадрі певному TDMA-кадру надається відповідний порядковий номер MP (0...2715647). Такий значний період гіперкадру зумовлений вимогами методу криптографічного захисту, в якому номер MP є вхідним параметром. Кожен TDMA-кадр поділено на вісім часових позицій (вікон) тривалістю $T_в = T_к/8 \approx$ 576,9 мкс. Конкретне вікно має власний номер і являє собою відтинок часу, протягом якого носійне коливання модулюється цифровим інформаційним потоком мовного повідомлення чи даних. Цей потік утворюється послідовністю пакетів, розміщених у відповідних часових інтервалах. Одне вікно вміщує 156,25 бітів, тобто швидкість передавання інформації радіоканалом становить $156,25/T_в$= 270,833 кбіт/с.

Вікно є фізичним каналом, що використовується як для передавання мовних повідомлень і сигналів керування, так і для підстроювання носійної частоти, синхронізації та організації абонентського доступу до каналу. Для забезпечення вказаних функцій передбачено п'ять варіантів структури вікна, які протягом мультикадру почергово формуються на одній і тій самій часовій позиції. Одна із цих структур, так званий нормальний пакет (NB – normal burst), показана на рис. 3.1. У мультикадрі з 26 TDMA-кадрів NB-пакет формується в усіх кадрах, крім 12 та 25-го, тому швидкість передавання мовної інформації у каналі становить $114 \cdot 24/120 \cdot 10^{-3}$ = 22,8 кбіт/с, що співпадає зі швидкістю на виході канального кодера. Інформаційний блок зі 114 бітів, що містить закодоване мовне повідомлення, розділено на два блоки по 57 бітів, між якими розташована так звана навчальна послідовність (26 бітів), яка потрібна для установлення коректора приймача відповідно до поточних характеристик радіоканалу. Це дозволяє коригувати амплітудно-частотну характеристику радіотракту кожні 4,6 мс, що ефективно запобігає багатопроменевим завмиранням.

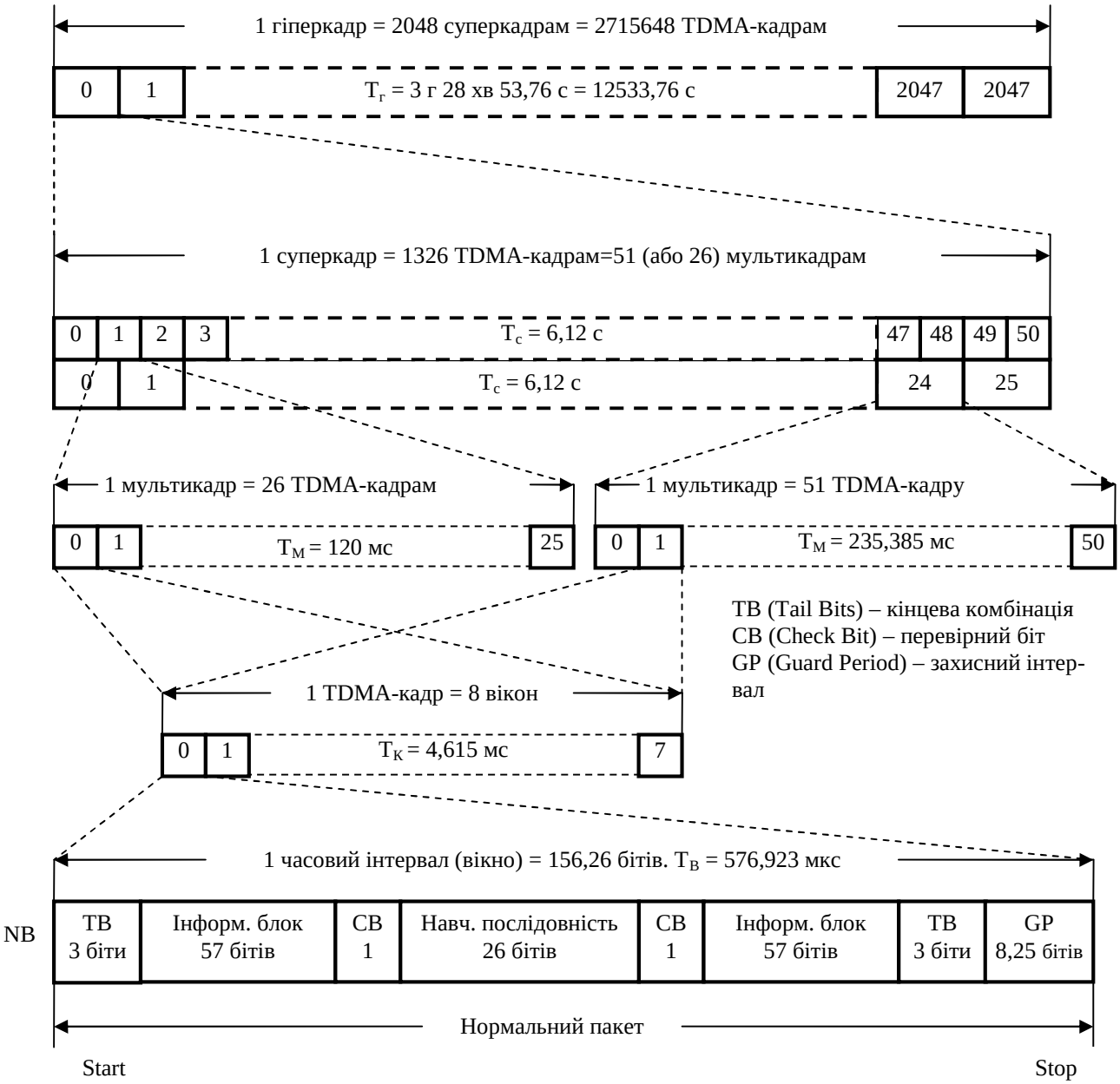

Рисунок 3.1 – Структура часових кадрів

При формуванні сигналів застосовують повільні (217 за секунду) стрибки частоти (SFH – Slow Frequency Hopping), завдяки чому повідомлення, що передається у наданому абоненту часовому інтервалі TDMA-кадру, у кожному наступному кадрі передається й приймається на новій фіксованій частоті зі збереженням дуплексного рознесення 45 МГц між каналами приймання і передавання. Технологія SFH забезпечує частотне рознесення у радіоканалах, що функціонують в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль. Це збільшує ефективність кодування та перемежування при повільному русі РС.

Крім нормальної структури NB, яка використовується для утворення логічних каналів навантаження і більшості керівних каналів, вікно передбачає ще такі структури (рис. 3.2).

Пакет підстроювання частоти FB (Frequency correction Burst). Періодично повторювані вікна цієї структури утворюють логічний канал підстроювання частоти FCCH (Frequency Correction Channel), в якому передається немодульована носійна частота з фіксованим зсувом відносно номінальної частоти каналу, що дозволяє синхронізувати носійну частоту рухомої станції.

Пакет синхронізації SB (Synchronization Burst). Відповідні вікна утворюють логічний канал кадрової синхронізації SCH (Synchronization CHannel), у якому передається 64-бітовий синхросигнал з номером TDMA-кадру та ідентифікаційним кодом базової станції. Цей пакет завжди супроводжує FB-пакет підстроювання частоти.

Установлювальний пакет DB (Dummy Burst) використовується для встановлення та тестування каналу зв'язку, має структуру, аналогічну NB, (рис. 3.1), і містить установлювальну послідовність з 26 бітів, але не має бітів перевірки.

Пакет доступу AB (Access Burst). Потрібний для організації доступу РС до нової БС. Значний захисний інтервал (68,25 бітів, тобто 252 мкс) пояснюється тим, що у чарунках максимально дозволеного радіуса (35 км) тривалість поширення сигналу в прямому і зворотному напрямах становить 233,3 мкс.

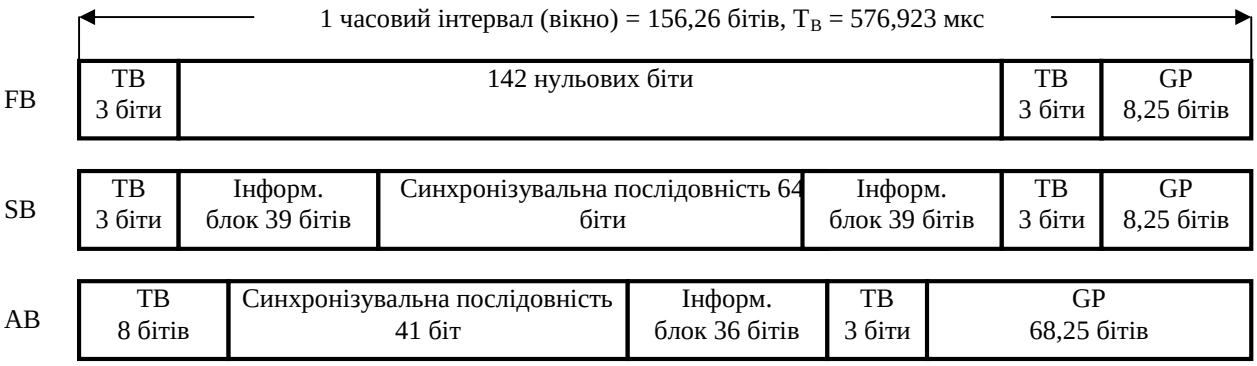

Рисунок 3.2 – Структура часового вікна

Розрізняють такі логічні канали навантаження: повношвидкісний (на 22,8 кбіт/с) **TCH/F** (TCH/Full rate) і напівшвидкісний (на 11,4 кбіт/с) **TCH/H** (TCH/Half rate). Умовно їх позначають відповідно як *Bm і Lm*. Фізичний канал може містити один логічний канал *Bm* або два *Lm*, що почергово користуються часовим вікном (через кадр). У каналі *Bm* можуть передаватися мовна інформація або дані зі швидкостями 9,6, 4,8 чи 2,4 кбіт/с. У каналі *Lm* з цих можливостей немає тільки передачі даних зі швидкістю 9,6 кбіт/с. Відповідно до конкретного призначення, до абревіатури TCH/F чи TCH/H додається літера S (Speech – мова) або цифра, що вказує швидкість даних, наприклад, TCH/H2.4 – напівшвидкісний логічний канал навантаження для передачі даних зі швидкістю 2,4 кбіт/с.

Керівні логічні канали розподілені на чотири функціональні групи.

1 Спільні керівні канали **CCCH** (Common Control CHannel) односторонньої дії:

- *канал виклику* **PCH** (Paging CHannel). Використовується тільки для виклику рухомих станцій з боку БС;
- *канал спільного доступу* **RACH** (Random Access CHannel). За його допомогою РС надсилає на БС запит призначення індивідуального керівного каналу (групи SDCCH);
- *канал дозволу доступу* **AGCH** (Access Grant CHannel). Потрібний для передачі від БС до РС номера індивідуального керівного каналу, який дасть їй можливість доступу до каналу зв’язку.

2 Автономні виділені (індивідуальні) керівні канали **SDCCH** (Standalone Dedicated Control CHannel) двосторонньої дії для зв’язку між БС і РС:

- *виділений керівний канал з чотирма підканалами* **SDCCH/4**;
- *виділений керівний канал з вісьмома підканалами* **SDCCH/8.**

Цими каналами БС запитує РС і отримує від неї інформацію про замовлюваний вид обслуговування, призначає РС канал навантаження тощо.

3 Суміщені керівні канали ACCH (Assotiated Control CHannels) двобічної дії для зв’язку між БС і РС:

- *швидкий суміщений керівний канал* **PACCH** (Fast ACCH) для сигнальної взаємодії БС і РС у процедурі естафетної передачі;
- *повільний суміщений керівний канал* **SACCH** (Slow ACCH) для передачі від БС до РС команд установлення потужності передавача, а від РС до БС даних про установлений рівень потужності, рівень та якість прийманих радіосигналів.

4 Канали керування передачею BCCH (Broadcast Control CHannels):

- *канал підстроювання частоти* PCCH;
- *канал синхронізації SCH*;
- *канал керування передачею* BCCH, що використовується у процесі призначення спільних керівних каналів, утворення об’єднаних каналів тощо.

Суміщені керівні канали завжди об’єднуються у мультикадрі з каналами навантаження чи з автономними керівними каналами. Абревіатура назви об’єднаного каналу отримує розширення / F, /H, /4 чи /8 при суміщенні з TCH/F, TCH/H, SDCCH/4 чи SDCCH/8 відповідно, наприклад, SDCCH/H – індивідуальний керівний канал, суміщений з напівшвидкісним каналом навантаження. Зокрема, при суміщенні у 26-кадровому мультикадрі за варіантом SACCH/F кадри 0...11 та 13…24 використовуються для організації повношвидкісного каналу навантаження TCH/F, кадр 12 – для каналу SACCH і кадр 25 залишається вільним. У варіанті SACCH/H два напівшвидкісних канали TCH/H чергуються у кадрах 0...11 та 13...24, при-

чому для одного з них суміщений керівний канал утворено у кадрі 12, а для другого – у кадрі 25.

Зазначимо, що для всіх керівних каналів, крім суміщених, організовуються 51-кадрові мультикадри.

У цілому системи стандарту GSM є суттєво завадостійкішими, а відповідні СМРЗ мають майже вдвічі менше БС, ніж NMT-450. Блочне і згорткове кодування з перемежуванням та рознесене приймання, створене перемиканням частот протягом сеансу зв’язку (SFH), дозволили зменшити потрібне для приймання відношення *сигнал/інтерференційна завада* до 9 дБ порівняно з 15...18 дБ в аналогових стандартах. Використаний тип модуляції зі швидкістю зменшення бічних пелюсток спектра до 10^{-6} на декаду (GMSK) забезпечує нехтовно малі позасмугові випромінювання та відсутність впливу на суміжні радіоканали.

4 ОСНОВИ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ’ЯЗКУ

Стільникові системи радіозв’язку мають структуру, засновану на стільниковій побудові і розподілі частот, відповідно до якої зона обслуговування поділяється на велику кількість невеликих осередків («чарунок») радіусом 1,5-5 км, кожен з яких обслуговується окремою базовою радіостанцією невеликої потужності, що знаходиться в центрі чарунки. Це дозволяє реалізувати основну перевагу стільникової системи – забезпечення високоякісним зв’язком значної кількості абонентів в умовах обмеженої кількості частотних каналів. Сукупність чарунок утворює зону обслуговування. У центрі зони розміщена центральна станція, яка з’єднана провідними, оптоволоконними чи радіорелейними лініями з телефонною мережею загального користування і з усіма базовими станціями, що знаходяться в зоні обслуговування. Абоненти за допомогою своїх абонентських систем можуть здійснювати зв’язок між собою і через центральну станцію виходити на будь-якого абонента телефонної мережі загального користування.

Стільникові системи характеризуються високою ефективністю використання радіочастотного спектра, вони є основним засобом забезпечення телефонного зв’язку, передачі даних і документального обміну в районах нової забудови, забезпечення зв’язком абонентів у важкодоступних районах та зв’язку з рухомими абонентами.

На відміну від зонових і транкінгових, стільникові мережі (cellular networks) дозволяють багаторазово використовувати радіоканали на територіально віддалених одна від однієї ділянках мережі. Приклад побудови такої мережі подано на рис. 4.1. Вся обслуговувана територія поділяється на малі робочі зони умовно шестикутної форми, що називаються чарунками мережі (cells). Радіус чарунки R визначається залежно від очікуваної в ній щільності рухомих абонентів. Звичайно він становить 10...20 км за містом і в передмістях, 2...3 км – на більшості території міста та 0,5...2 км – у його центрі. У кожній чарунці установлюється індивідуальна або спільна для кількох чарунок базова приймально-передавальна радіостанція (base transceiver station), яку звичайно називають просто базовою станцією (БС). Вона може знаходитись у центрі чарунки і мати антену з круговою діаграмою випромінювання, або установлюватись на стику кількох чарунок і мати секторні антени (120°, як на рис. 4.1, або, наприклад, 60°) для кожної з них. Зазначимо, що у останньому випадку інколи чарункою називають сукупність зон обслуговування однієї БС, а окрему її зону називають сектором. У певній чарунці РС за допомогою БС мають повний доступ до призначених цій чарунці N радіоканалів. БС, що використовують однаковий набір частотних каналів, розділяються захисним інтервалом D.

Щоб перекрити довільну територію, в принципі достатньо K = 7 багаторазово використовуваних наборів радіоканалів (як на рис. 4.1, де їх

номери обведені прямокутними рамками), але деякі стільникові радіотелефонні системи передбачають K = 4, 9, 12 або 21. Група із K суміжних чарунок, в яких набори каналів не повторюються, називається кластером (cluster). На рис. 4.1 його виділено товщою лінією. Величина K називається розміром кластера, а також частотним параметром системи, оскільки визначає максимально можливу кількість каналів N (без врахування їх повторного використання) та загальну ширину частотної смуги F_c. З точки зору ефективності використання частотного спектра доцільно вибирати малі радіуси чарунок та розміри кластерів з урахуванням того, що захисний інтервал D в разі БС із ненаправленими антенами дорівнює $\sqrt{3 \cdot \mathrm{K}} \cdot R$. З іншого боку, зменшення параметра K обмежене вимогами до захисного інтервалу, а зменшення радіуса R призводить до збільшення частоти перетинання чарунок рухомими абонентами під час розмови, що може, у свою чергу, спричинити лавиноподібне зростання завантаженості керуючої системи мережі даними щодо перетинання РС меж чарунок. Тому в межах однієї системи можуть використовуватись чарунки та кластери різних розмірів, їх вибирають з урахуванням реальної електромагнітної обстановки та рельєфу місцевості. Часто застосовують накладені чарунки - у такому разі мікро і навіть пікочарунки з радіусом 10...70 м обслуговують закриті приміщення (аеропорти, вокзали, гаражі, магазини тощо), а також РС, що рухаються повільно, а чарунки великих радіусів, які охоплюють цю ж територію, приймають навантаження від РС, що рухаються швидко. Такі структури стільникової мережі інколи називають зонтовими. В перспективі так буде побудована і глобальна система рухомого зв'язку.

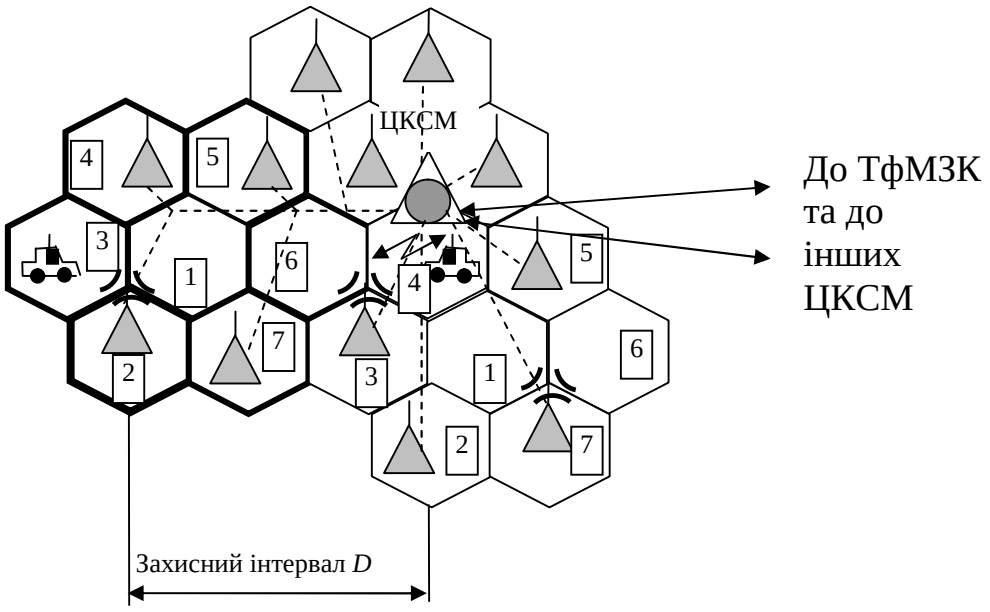

Рисунок 4.1 – Приклад побудови стільникової мережі рухомого зв'язку

У стільникових мережах часто має місце фіксований розподіл радіоканалів між БС, коли для кожної чарунки виділяється однакове їх число N_c. У такому разі важливо так розподілити канали, щоб по можливості зменшити міжканальну інтерференцію. Звичайно застосовують наступний принцип розподілу: j-й чарунці кластера призначають канали з номерами j, $j + K$, $j + 2K$, …, $j + N_c K$. Фіксоване закріплення каналів має недоліки, викликані нестаціонарністю поділу активних РС на території мережі, а саме – ймовірність втрат викликів зростає у чарунках, де з різних причин РС стає більше. Тому інколи для кожної чарунки крім N_c фіксованих виділяють ще деяку кількість каналів, які динамічно розподіляються між БС залежно від виниклої потреби. Такий, так званий, динамічний розподіл радіоканалів між БС суттєво знижує ймовірність відмови у наданні радіоканалу РС, але вимагає наявності на БС додаткових, не весь час використовуємих прийомопередавачів.

Всі БС з'єднуються радіорелейними або кабельними лініями зв'язку з центром комутації стільникової мережі (ЦКСМ), який керує установленням і підтриманням сполучень РС між собою та з абонентами телефонної мережі загального користування (ТфМЗК), зокрема забезпечує перемикання з'єднання на іншу БС під час руху РС. Комутація і керування мережею можуть бути:

– централізованими, тобто зосередженими на ЦКСМ, як це показано на рис. 4.1;

– децентралізованими (ієрархічними) із установленням, наприклад, у кожному кластері спрощеної комутаційної станції, так званого контролера базових станцій (Base Station Controller), який обслуговує взаємні з'єднання РС у межах кластера та забезпечує вихід на ЦКСМ для всіх інших зв'язків;

– розподіленими, коли комутаційне і керівне обладнання установлюється безпосередньо на кожній БС.

Територію, що обслуговується одним ЦКСМ, як, наприклад, на рис. 4.1, називають зоною обслуговування ЦКСМ, а сукупність чарунок мережі, що мають спільну БС – зоною БС.

Мережні та радіоінтерфейси систем стільникового зв'язку

При проектуванні цифрових стільникових систем рухомого зв'язку стандарту GSM розглядаються інтерфейси трьох видів:

1) для з'єднання з зовнішніми мережами,
2) між різним обладнанням мереж GSM,
3) між мережею GSM і зовнішнім обладнанням.

Всі існуючі внутрішні інтерфейси мереж GSM цілком відповідають вимогам Рекомендацій ETSI/GSM 03.02.

1) Інтерфейси з зовнішніми мережами

З'єднання з ТфМЗК. З'єднання з телефонною мережею загального користування здійснюється MSC по лінії зв'язку зі швидкістю потоку

2 Мбіт/с відповідно до системи сигналізації SS № 7. Електричні характеристики 2 Мбіт/с інтерфейсу відповідають Рекомендаціям МСЕ-Т G.732.

З'єднання з ISDN. Для з'єднання зі створюваними мережами ISDN передбачаються чотири лінії зв'язку зі швидкістю потоку 2 Мбіт/с, які підтримуються системою сигналізації SS № 7 і відповідають Рекомендаціям Блакитної книги МСЕ-Т Q.701- Q.710, Q.711-Q.714, Q.716, Q.781, Q.782, Q.791, Q.795, Q.761-Q.764, Q.766.

З'єднання з існуючою мережею NMT-450. Центр комутації рухомого зв'язку з'єднується з мережею NMT-450 через чотири стандартні лінії зв'язку зі швидкістю потоку 2 Мбіт/с і системою сигналізації SS № 7. При цьому повинні забезпечуватися вимоги Рекомендацій МСЕ-Т за підсистемою користувачів телефонною мережею (TUP – Telephone User Part) і підсистемою передачі повідомлень (MTP – Message Transfer Part) Жовтої книги. Електричні характеристики лінії зі швидкістю потоку 2 Мбіт/с відповідають Рекомендаціям МСЕ-Т G.732.

З'єднання з міжнародними мережами GSM. Ці з'єднання здійснюються на основі протоколів системи сигналізації SCCP і міжмережної комутації рухомого зв'язку GMSC.

2) Внутрішні GSM - інтерфейси

Інтерфейс між MSC і BSS – А-інтерфейс, забезпечує передачу повідомлень для керування BSS, передачі виклику, керування пересуванням. А-інтерфейс поєднує канали зв'язку і лінії сигналізації. Останні використовують протокол SS № 7 МСЕ-Т. Повна специфікація А-інтерфейсу відповідає вимогам серії 08 Рекомендацій ETSI/GSM.

Інтерфейс між MSC і HLR з'єднаним з VLR – В-інтерфейс. Коли MSC необхідно з'ясувати місце розташування рухомої станції, він звертається до VLR. Якщо рухома станція ініціює процедуру визначення місця з MSC, він інформує свій VLR, який заносить всю інформацію, що змінюється, у свої регістри. Ця процедура відбувається завжди, коли MS переходить з однієї чарунки в іншу. У випадку, якщо абонент запитує спеціальні чи додаткові послуги або змінює деякі свої дані, MSC також інформує VLR, який реєструє зміни і за необхідності повідомляє про них HLR.

Інтерфейс між MSC і HLR – С-інтерфейс, використовується для забезпечення взаємодії між MSC і HLR. MSC може послати вказівку (повідомлення) HLR наприкінці сеансу зв'язку для того щоб абонент міг оплатити розмову. Коли мережа фіксованого телефонного зв'язку не здатна виконати процедуру установлення виклику рухомого абонента, MSC може запросити HLR про місце розташування абонента для того, щоб послати виклик РС.

Інтерфейс між HLR і VLR – D-інтерфейс, використовується для розширення обміну даними про положення рухомої станції, керування процесом зв'язку. Основні послуги, що надаються рухомому абоненту, полягають у можливості передавати чи приймати повідомлення незалежно

від місця розташування. Для цього HLR повинен поповнювати свої дані. VLR повідомляє HLR про положення РС, керуючи нею і перепривласнюючи їй номера в процесі блукання, посилає всі необхідні дані для забезпечення обслуговування рухомої станції.

Інтерфейс між MSC – Е-інтерфейс, забезпечує взаємодію між різними MSC при здійсненні процедури HANDOVER - "передачі" абонента з зони в зону при його русі в процесі сеансу зв’язку без його переривання.

Інтерфейс між BSC і BTS – A-bis інтерфейс, служить для зв’язку BSC з BTS і визначений Рекомендаціями ETSI/GSM для процесів установлення з’єднань і керування обладнанням. Передача здійснюється цифровими потоками зі швидкістю 2,048 Мбіт/с. Можливе використання фізичного інтерфейсу 64 кбіт/с.

Інтерфейс між BSC і OMC – О-інтерфейс, призначений для зв’язку BSC з ОМС, використовується в мережах з пакетною комутацією.

Внутрішній BSC-інтерфейс контролера базової станції забезпечує зв’язок між різним обладнанням BSC і обладнанням транскодування (ТС); він використовує стандарт IKM-передачі 2,048 Мбіт/с і дозволяє організувати з чотирьох каналів зі швидкістю 16 кбіт/с один канал на швидкості 64 кбіт/с.

Інтерфейс між MS і BTS – Um-радіоінтерфейс визначений у серіях 04 і 05 Рекомендацій ETSI/GSM.

Мережний інтерфейс між ОМС і мережею – так званий керуючий інтерфейс між ОМС і елементами мережі, визначений ETSI/GSM Рекомендаціями 12.01.

З’єднання мережі з ОМС можуть забезпечуватися системою сигналізації МСЕ-Т SS № 7 чи мережним протоколом Х.25.

GSM-протокол керування мережею й обслуговуванням також повинний задовольняти вимогам Q.3-інтерфейсу, що визначений в ETSI/GSM Рекомендаціях 12.01.

3) Інтерфейси між мережею GSM і зовнішнім устаткуванням

Інтерфейс між MSC і сервіс-центром (SC) необхідний для реалізації служби коротких повідомлень. Він визначений у ETSI/GSM Рекомендаціях 03.40.

Інтерфейс до інших ОМС. Кожен центр керування й обслуговування мережі повинен мати можливість з’єднуватися з іншими ОМС, що керують мережами в інших регіонах чи іншими мережами. Ці з’єднання забезпечуються Х – інтерфейсами відповідно до Рекомендацій МСЕ-Т М.30. Для взаємодії ОМС з мережами вищих рівнів використовується Q.3–інтерфейс.

5 СТРУКТУРА ОБЛАДНАННЯ МЕРЕЖ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ’ЯЗКУ

Функціональна побудова та інтерфейси, прийняті у стандарті GSM, ілюструються структурною схемою на рис. 5.1.

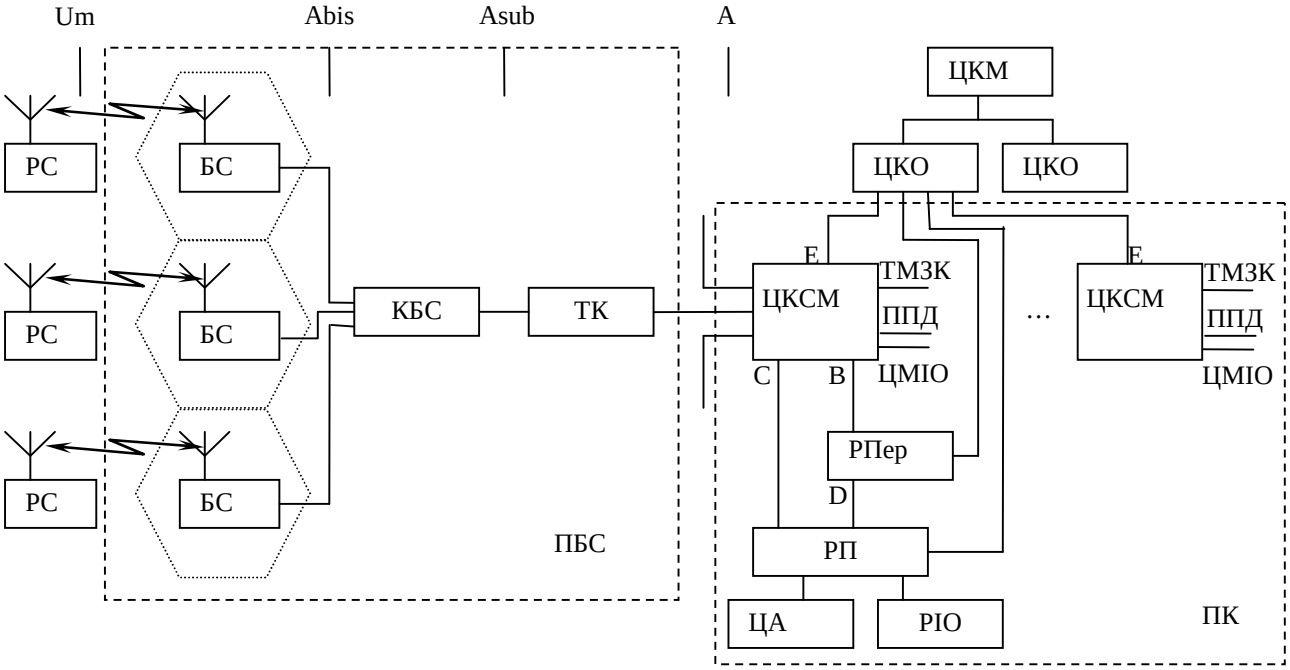

Рисунок 5.1 – Функціональна побудова мережі стандарту GSM900/1800

На рис. 5.1 прийняті такі позначення:
БС – базова станція (BS); КБС – контролер БС (BSC);
ЦКСМ – центр комутації стільникової мережі (MSC);
ЦКО – центр керування та обслуговування (OMC);
ЦКМ – центр керування мережею (NMC);
ТМЗК – телефонна мережа загального користування (PSTN);
ППД – мережа пакетної передачі даних (PDN);
ЦМІО – цифрова мережа з інтеграцією обслуговування (ISDN);
РПер – регістр переміщення (VLR); РП – регістр положення (HLR);
ЦА – центр автентифікації (AUC);
ТК – транскодер (TC); РС – рухома станція (MS);
РІО – регістр ідентифікації обладнання (EIR);
ПБС – підсистема БС (BSS);
ПК – підсистема комутації (SSS).

Центр комутації стільникової мережі обслуговує групу чарунок і забезпечує усі види з’єднань, в яких має потребу в процесі роботи рухома станція. MSC аналогічний комутаційній станції ISDN і являє собою інтерфейс між фіксованими мережами (PSTN, PDN, ISDN і т.д.) і мережею рухомого зв’язку. Він забезпечує маршрутизацію викликів і функції керуван-

ня викликами. Крім виконання функцій звичайної комутаційної станції ISDN, на MSC покладаються функції комутації радіоканалів. До них відносяться "естафетна передача", у процесі якої досягається безперервність зв’язку при переміщенні рухомої станції з чарунки у чарунку, і переключення робочих каналів у чарунці з появою перешкод або за несправностей.

Кожен MSC забезпечує обслуговування рухомих станцій, які знаходяться у межах визначеної географічної зони (наприклад, центр комутації, розташований у м. Одесі, обслуговує мережі Одеської, Миколаївської та Херсонської областей). MSC керує процедурами установлення виклику і маршрутизації. Для телефонної мережі загального користування (PSTN) MSC забезпечує функції сигналізації за протоколом SS № 7, передачі виклику чи інші види інтерфейсів відповідно до вимог конкретного проекту. MSC формує дані, необхідні для виписки рахунків за надані мережею послуги зв’язку, накопичує дані про розмови, що відбулися, і передає їх у центр розрахунків (білінг-центр). MSC складає статистичні дані, необхідні для контролю роботи й оптимізації мережі. MSC підтримує також процедури безпеки, застосовувані для керування доступами до радіоканалів.

MSC не тільки бере участь у керуванні викликами, але також керує процедурами реєстрації місця знаходження і передачі керування, крім передачі керування в підсистемі базових станцій (BSS). Реєстрація місця знаходження рухомих станцій необхідна для забезпечення доставки виклику рухомим абонентам від абонентів телефонної мережі загального користування чи інших рухомих абонентів. Процедура передачі виклику дозволяє зберігати з’єднання і забезпечувати ведення розмови, коли рухома станція переміщується з однієї зони обслуговування в іншу. Передача викликів у чарунках, що керуються одним контролером базових станцій (BSC), здійснюється цим BSC. Коли передача викликів здійснюється між двома мережами, керованими різними BSC, то первинне керування здійснюється в MSC. У стандарті GSM також передбачені процедури передачі виклику між мережами (контролерами), що відносяться до різних MSC.

Ідеологія стандарту GSM побудована таким чином, що абонент та термінал (радіотелефон) незалежні один від одного. Кожний абонент отримує свій міжнародний ідентифікаційний номер (IMSI), який записаний в модуль дійсності абонента – SIM-карту та зберігається у регістрі положення. З іншого боку, кожній мобільній станції також присвоюється свій міжнародний ідентифікаційний номер (IMEI). У регістрі автентифікації обладнання зберігаються номера IMEI, володарі яких мають право доступу до мережі, а також номери, яким за різними причинами відмовлено в обслуговуванні. Це запобігає доступу до мережі таких терміналів, які були викрадені, або не мають необхідних повноважень. Усі ці механізми виключають несанкціонований доступ до ресурсів мережі.

Центр комутації здійснює постійне спостереження за рухомими станціями, використовуючи регістри положення (HLR) і переміщення (VLR).

У HLR зберігається та частина інформації про місце знаходження будь-якої рухомої станції, що дозволяє центру комутації доставити виклик станції. Регістр HLR містить міжнародний ідентифікаційний номер рухомого абонента (IMSI). Він використовується для впізнавання рухомої станції в центрі автентифікації (AUC). Практично HLR являє собою довідкову базу даних про постійно прописаних у мережі абонентів. У ній містяться пізнавальні номери й адреси, а також параметри дійсності абонентів, склад послуг зв'язку, спеціальна інформація про маршрутизацію. Ведеться реєстрація даних про роумінг (блукання) абонента, включаючи дані про тимчасовий ідентифікаційний номер рухомого абонента (TMSI) у відповідному VLR.

До даних, що містяться в HLR, мають дистанційний доступ усі MSC і VLR мережі і, якщо в мережі є декілька HLR, у базі даних міститься тільки один запис про абонента, тому кожен HLR являє собою певну частину загальної бази даних мережі про абонентів. Доступ до бази даних про абонентів здійснюється за номерами TMSI чи MSISDN (номера рухомого абонента в мережі ISDN). До бази даних можуть одержати доступ MSC чи VLR, що відносяться до інших мереж, у рамках забезпечення міжмережного роумінга абонентів.

Другий основний пристрій, що забезпечує контроль за пересуванням рухомої станції з зони в зону, – регістр переміщення VLR. За його допомогою досягається функціонування рухомої станції за межами зони, контрольованої HLR. Коли в процесі переміщення рухома станція переходить із зони дії одного контролера базових станцій BSC, що поєднує групу базових станцій, у зону дії іншого BSC, вона реєструється новим BSC, і в VLR заноситься інформація про номер області зв'язку, яка забезпечить доставку викликів рухомій станції. Для збереження даних, що знаходяться в HLR і VLR, у випадку збоїв, передбачено захист пристроїв пам'яті цих регістрів.

VLR містить такі ж дані, як і HLR, однак ці дані містяться в VLR тільки доти, поки абонент знаходиться в зоні, контрольованій VLR.

У мережі рухомого зв'язку GSM чарунки групуються в географічні зони (LA), яким привласнюється свій ідентифікаційний номер (LAC). Кожен VLR містить дані про абонентів декількох LA. Коли рухомий абонент переміщується з однієї LA в іншу, дані про його місце розташування автоматично оновлюються в VLR. Якщо стара і нова LA знаходяться під керуванням різних VLR, то дані на старому VLR стираються після їхнього копіювання в новий VLR. Поточна адреса VLR абонента, що міститься в HLR, також оновлюється.

VLR забезпечує також присвоєння номера "блукаючій" рухомій станції (MSRN). Коли рухома станція приймає вхідний виклик, VLR вибирає його MSRN і передає його на MSC, що здійснює маршрутизацію цього виклику до базової станції, яка обслуговує рухомого абонента. VLR також розподіляє номера передачі керування при переводі з'єднань від одного

MSC до іншого. Крім того, VLR керує розподілом нових TMSI і передає їх у HLR. Він також керує процедурами установлення дійсності під час обробки виклику. За рішенням оператора, ідентифікаційний номер TMSI може періодично змінюватися для ускладнення процедури ідентифікації абонентів. Доступ до бази даних VLR може забезпечуватися через IMSI, TMSI чи MSRN. У цілому VLR являє собою локальну базу даних про рухомого абонента для тієї зони, де знаходиться абонент, що дозволяє виключити постійні запити в HLR і скоротити час на обслуговування викликів. Повний склад інформації, яка зберігається у регістрах HLR і VLR, перелічено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Повний склад довгострокових даних, що зберігаються у HLR і VLR

1	Міжнародний ідентифікаційний номер передплатника (IMSI)
2	Телефонний номер абонента в звичайному змісті (MSISDN)
3	Ключ ідентифікації абонента (Ki)
4	Категорія рухомої станції
5	Види забезпечення додатковими послугами
6	Індекс закритої групи користувачів
7	Код блокування закритої групи користувачів
8	Склад основних викликів, що можуть бути передані
9	Оповіщення абонента, що викликає
10	Ідентифікація номера викликуваного абонента
11	Графік роботи
12	Оповіщення викликуваного абонента
13	Контроль сигналізації при з’єднанні абонентів
14	Характеристики закритої групи користувачів
15	Пільги закритої групи користувачів
16	Заборонені вихідні виклики в закритій групі користувачів
17	Максимальна кількість абонентів
18	Використовувані паролі
19	Клас пріоритетного доступу

Для виключення несанкціонованого використання ресурсів системи зв’язку вводяться механізми автентифікації – перевірка дійсності абонента. Центр автентифікації (AUC) складається з декількох блоків і формує ключі й алгоритми автентифікації. За його допомогою перевіряються повноваження абонента і здійснюється доступ абонента до мережі зв’язку. AUC приймає рішення про параметри процесу автентифікації і визначає ключі шифрування абонентських станцій на основі бази даних, зосередженої в регістрі ідентифікації обладнання (EI – Equipment Identification Register).

Кожен рухомий абонент на час користування системою зв’язку одержує стандартний модуль справжності абонента (SI), що містить: міжнародний ідентифікаційний номер (IMSI), свій індивідуальний ключ автентифікації (Ki) та алгоритм автентифікації (A3).

За допомогою записаної в SI інформації в результаті взаємного обміну даними між рухомою станцією і мережею здійснюється повний цикл автентифікації і дозволяється доступ абоненту до мережі.

Процедура перевірки мережею справжності абонента реалізується таким способом. Мережа передає випадковий номер (RAND) на рухому станцію. На ній за допомогою Ki й алгоритму автентифікації A3 визначається значення відгуку (SRES), тобто

$$SRES = Ki * [RAND].$$

Рухома станція посилає обчислене значення SRES у мережу, яка звіряє значення прийнятого SRES зі значенням SRES, обчисленим мережею. Якщо ці значення збігаються, рухома станція приступає до передачі повідомлень. В іншому випадку зв'язок переривається, а індикатор рухомої станції показує, що розпізнавання не відбулося. Для забезпечення таємності обчислення SRES відбувається в рамках SI. Несекретна інформація (наприклад, Ki) не піддається обробці в модулі SI.

EI - регістр ідентифікації обладнання, містить централізовану базу даних для підтвердження дійсності міжнародного ідентифікаційного номера обладнання рухомої станції (IMEI). Ця база даних відноситься виняткова до обладнання рухомої станції. База даних EI складається зі списків номерів IMEI, організованих таким чином:

БІЛИЙ СПИСОК – містить номери IMEI, про які є відомості, що вони закріплені за санкціонованими рухомими станціями;

ЧОРНИЙ СПИСОК – містить номери IMEI рухомих станцій, що украдені або яким відмовлено в обслуговуванні з інших причин;.

СІРИЙ СПИСОК – містить номери IMEI рухомих станцій, у яких існують проблеми, виявлені за даними програмного забезпечення, що не є підставою для внесення в "чорний список".

До бази даних EI одержують дистанційний доступ MSC даної мережі, а також MSC інших мереж.

Як і у випадку з HLR, мережа може мати більше одного EI, при цьому кожен EI керує певними групами IMEI. До складу MSC входить транслятор, що при одержанні номера IMEI повертає адресу EI, який керує відповідною частиною бази даних про обладнання.

IWF – міжмережний функціональний стик, є однієї з складових частин MSC. Він забезпечує абонентам доступ до засобів перетворення протоколу і швидкості передачі даних так, щоб можна було передавати їх між термінальним обладнанням (DI) мережі GSM і термінальним обладнанням фіксованої мережі. Міжмережний функціональний стик також "виділяє" модем зі свого банку обладнання для сполучення з відповідним модемом фіксованої мережі. IWF також забезпечує інтерфейси типу прямого з'єднання для обладнання, що поставляється клієнтам, наприклад, для пакетної передачі даних PAD за протоколом X.25.

EC (Echo Canceller) – лунопридушувач, використовується в MSC з боку PSTN для всіх телефонних каналів (незалежно від їхньої довжини) через фізичні затримки в трактах поширення, включаючи радіоканал мереж GSM. Типовий лунопридушувач може забезпечувати придушення в інтервалі 68 мс на ділянці між виходом EC і телефоном фіксованої телефонної мережі. Загальна затримка в каналі GSM при поширенні в прямому і зворотному напрямках, викликана обробкою сигналу, кодуванням/декодуванням мови, канальним кодуванням тощо, складає близько 180 мс. Ця затримка була б непомітна рухомому абоненту, якби в телефонний канал не була включена дифсистема з перетворенням тракту з двопровідного на чотирипровідний режим, установка якого необхідна в MSC, тому що стандартне з’єднання з PSTN є двопровідным. При з’єднанні двох абонентів фіксованої мережі луносигнали відсутні. Без включення EC затримка від поширення сигналів у тракті GSM буде викликати роздратування в абонентів, переривати мову і відволікати увагу.

6 ОБЛАДНАННЯ МЕРЕЖІ

ОМС (Operations and Maintenance Centre) – центр керування та обслуговування є центральним елементом мережі GSM, що забезпечує контроль і керування іншим обладнанням мережі і контроль якості його роботи. ОМС з’єднується з іншим обладнанням мережі GSM по каналах пакетної передачі за протоколом X.25. ОМС забезпечує функції обробки аварійних сигналів, призначених для оповіщення обслуговуючого персоналу, і реєструє відомості про аварійні ситуації в іншому обладнанні мережі. У залежності від характеру несправності ОМС дозволяє забезпечити її усунення автоматично чи за активного втручання персоналу. ОМС може забезпечити перевірку стану обладнання мережі і проходження виклику рухомої станції. ОМС дозволяє виконувати керування навантаженням у мережі. Функція ефективного керування включає збір статистичних даних про навантаження від компонентів мережі GSM, запису їх у дискові файли і виведення на дисплей для візуального аналізу. ОМС забезпечує керування змінами програмного забезпечення і базами даних про конфігурацію елементів мережі. Завантаження програмного забезпечення в пам’ять може здійснюватись з ОМС в інші елементи мережі чи з них в ОМС.

NMC (Network Management Centre) – центр керування мережею, дозволяє забезпечувати раціональне ієрархічне керування мережею GSM. Він забезпечує експлуатацію і технічне обслуговування на рівні всієї мережі, підтримуваної центрами ОМС, що відповідають за керування регіональними мережами. NMC забезпечує керування трафіком в усій мережі і забезпечує диспетчерське керування мережею за складних аварійних ситуацій, як наприклад, вихід з ладу чи перевантаження вузлів. Крім того, він контролює стан пристроїв автоматичного керування, задіяних в устаткуванні мережі, і відбиває на дисплеї стан мережі для операторів NMC. Це дозволяє операторам контролювати регіональні проблеми і, за необхідності, робити допомогу ОМС, відповідальному за конкретний регіон. Таким чином, персонал NMC знає стан усієї мережі і може дати вказівку персоналу ОМС змінити стратегію вирішення регіональної проблеми.

NMC зосереджує увагу на маршрутах сигналізації і з’єднаннях між вузлами для того, щоб не допускати умов для виникнення перевантаження в мережі. Контролюються маршрути з’єднань між мережею GSM і PSTN щоб уникнути поширення умов перевантаження між мережами. При цьому персонал NMC координує питання керування мережею з персоналом інших NMC. NMC забезпечує можливість керування трафіком для мережного обладнання підсистеми базових станцій (BSS). Оператори NMC в екстремальних ситуаціях можуть задіяти такі процедури керування, як "пріоритетний доступ", коли тільки абоненти з високим пріоритетом (екстрені служби) можуть одержати доступ до системи.

NMC може брати на себе відповідальність в будь-якому регіоні, коли місцевий OMC не обслуговує регіон, при цьому OMC діє як транзитний пункт між NMC і устаткуванням мережі. NMC забезпечує операторів функціями, аналогічними функціям OMC. NMC є важливим інструментом планування мережі, тому що NMC контролює мережу і її роботу на мережному рівні, і таким чином забезпечує планувальників мережі даними, що визначають її оптимальний розвиток.

BSS (Base Station System) – обладнання базових станцій, складається з контролера базових станцій (BSC) та приймально-передавальних базових станцій (BTS). Контролер базових станцій може керувати декількома приймально-передавальними блоками. BSS керує розподілом радіоканалів, контролює з'єднання, регулює їхню черговість, забезпечує режим роботи зі стрибаючою частотою, модуляцію і демодуляцію сигналів, кодування і декодування повідомлень, кодування мови, адаптацію швидкості передачі для мови, даних і виклику, визначає черговість передачі повідомлень персонального виклику.

Для спрощення функціонування системи і зниження службового трафіка, BTS поєднують у групи – домени, що одержали назву LA (Location Area – області знаходження). Кожній LA відповідає свій код LAI (Location Area Identity). Один VLR може контролювати декілька LA. І саме LAI міститься в VLR для завдання місця знаходження мобільного абонента. У разі потреби саме у відповідній LA (а не в окремій чарунці) буде зроблений пошук абонента. При переміщенні абонента з однієї чарунки в іншу в межах однієї LA перереєстрація і зміна записів у VLR/HLR не здійснюється, але як тільки абонент потрапляє на територію іншої LA, почнеться взаємодія РС з мережею. При зміні LA код старої області стирається у VLR і замінюється новим LAI, якщо ж наступний LA контролюється іншим VLR, тоді відбудеться зміна VLR і відновлення запису в HLR.

Взагалі, розбивка мережі на LA досить непроста інженерна задача, яка розв'язується при побудові кожної мережі індивідуально. Занадто дрібні LA приведуть до частих перереєстрацій телефонів і, як наслідок, до зростання трафіка різного роду сервісних сигналів і більш швидкої розрядки батарей РС. Якщо ж зробити LA великими, то, у разі потреби з'єднання з абонентом, сигнал виклику прийдеться подавати всім чарункам, що входять у LA, що також веде до невиправданого зростання передачі службової інформації і перевантаження внутрішніх каналів мережі.

BSS разом з MSC, HLR та VLR виконує деякі особливі функції, наприклад: звільнення каналу, головним чином, під контролем MSC, але MSC може запросити базову станцію забезпечити звільнення каналу, якщо виклик не проходить через радіоперешкоди. BSS і MSC спільно здійснюють пріоритетну передачу інформації для деяких категорій рухомих станцій.

TC (Speech Transcoder) – транскодер, забезпечує перетворення вихідних сигналів каналу передавання мови і даних MSC (64 кбіт/з IKM) до виду, що відповідає рекомендаціям GSM по радіоінтерфейсу (Рек. GSM 04.08). Відповідно до цих вимог швидкість передавання мови, представленої в цифровій формі, складає 13 кбіт/с. Цей канал передавання цифрових мовних сигналів називається "повношвидкісним". Стандартом передбачається в перспективі використання напівшвидкісного мовного каналу (швидкість передавання 6,5 кбіт/с).

Зниження швидкості передавання забезпечується застосуванням спеціального мовоперетворюючого пристрою, що використовує лінійне кодування з пророкуванням (LPC), довгострокове прогнозування (LTP), залишкове імпульсне збудження (RPE – іноді називається RELP).

Транскодер звичайно розташовується поряд з MSC, тоді передача цифрових повідомлень у напрямку до контролера базових станцій – BSC відбувається з додаванням до потоку зі швидкістю передавання 13 кбіт/с, додаткових бітів (стафінг) до швидкості передавання даних 16 кбіт/с. Потім здійснюється ущільнення з кратністю 4 у стандартний канал 64 кбіт/с. Так формується визначена Рекомендаціями GSM 30 – канальна IKM лінія, яка забезпечує передачу 120 мовних каналів. Шістнадцятий канал (64 кбіт/с), "канальний інтервал", виділяється окремо для передачі інформації сигналізації і часто містить трафік SS № 7 чи LAPD. В іншому каналі (64 кбіт/с) можуть передаватися також пакети даних.

Таким чином, результуюча швидкість передавання по зазначеному інтерфейсу складає 30 × 64 кбіт/с + 64 кбіт/с + 64 кбіт/с = 2048 кбіт/с.

Мобільна станція (MS) складається з мобільного обладнання (термінала) і картки, названої Модулем Ідентифікації Абонента (SIM – Subscriber Identity Module). У SIM-карті міститься інформація про сервіси, надані абоненту, незалежно від типу використовуваного мобільного обладнання. Ця карта може вставлятися в будь-який інший GSM термінал, при цьому абонент одержує можливість використовувати цей термінал для одержання всіх сервісів системи, на які він підписаний. Мобільне обладнання унікально ідентифікується Міжнародним Ідентифікатором Мобільного устаткування (IMEI – International Mobile Equipment Identity). SIM-карта містить Міжнародний Ідентифікатор Мобільного Абонента (IMSI – International Mobile Subscriber Identity), який використовується для ідентифікації абонента системою; секретний ключ авторизації доступу та іншу інформацію. Ідентифікатори IMEI й IMSI - незалежні між собою. SIM-карта може бути захищена від неавторизованого доступу за допомогою системи паролів.

У рамках стандарту GSM прийняті п'ять класів рухомих станцій від моделі 1-го класу з вихідною потужністю 20 Вт, яка установлюється на транспортному засобі до портативної моделі 5-го класу, з максимальною потужністю 0,8 Вт (табл. 6.1). Під час передавання повідомлень передбача-

ється адаптивне регулювання потужності передавача, що забезпечує необхідну якість зв’язку.

Таблиця 6.1 – Класи рухомих станцій

Клас потужності	Максимальний рівень потужності передавача	Припустимі відхилення
1	20 Вт	1,5 дБ
2	8 Вт	1,5 дБ
3	5 Вт	1,5 дБ
4	2 Вт	1,5 дБ
5	0,8 Вт	1,5 дБ

Як вже зазначалося, відповідно до максимальної потужності передавача, існують п’ять класів мобільних станцій: на 20, 8, 5, 2 і 0,8 Вт. Для мінімізації міжканальної інтерференції й економії електроенергії, мобільна і базова станції працюють у найбільш низькому (за потужністю) з можливих рівні потужності. Рівні потужності можуть підвищуватися/знижуватися відрізками по 2 дБ від максимальної для даного класу потужності до 13 дБм (20 мВт).

Мобільна станція вимірює потужність сигналів або їхню якість (ґрунтуючись на пропорціях помилок – Bit Error Ratio) і передає інформацію Контролеру Базової Станції, який вирішує, потрібно змінити рівень потужності чи ні, і якщо потрібно, то коли. Керування потужністю повинно здійснюватися дуже обережно, оскільки існує велика ймовірність створення нестабільності в роботі системи зв’язку. Великі проблеми виникають, наприклад, при спробі мобільної станції підвищити рівень потужності у відповідь на підвищену міжканальну інтерференцію, викликану підвищенням потужності іншими мобільними станціями.

7 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ

Оптимальне проектування системи стільникового рухомого радіозв'язку (ССРР) є дуже складною багатофакторною задачею, яка не має точного аналітичного рішення і звичайно вирішується за допомогою ітераційних комп'ютерних програм. На сьогодні основні виробники обладнання для ССРР використовують власні програми, а єдиної загальновизнаної методики проектування не існує. В той же час розглянута нижче спрощена методика дає прийнятні за точністю результати на етапі створення ССРР, а наступний їх розвиток може оптимально плануватися на основі реальних статистичних даних, оцінених на створеній мережі.

Частотно-територіальне планування, тобто закріплення частотних каналів за окремими зонами, є однією з найбільш складних і трудомістких процедур при проектуванні ССРР. Ця процедура поділяється на три самостійні задачі:

– виділення з заданого частотного діапазону груп інтермодуляційно сумісних частот;

– оптимальне присвоєння частотних каналів базовим станціям;

– вибір місця розташування БС і розрахунок напруженості поля з урахуванням рельєфу місцевості на заданій території.

Зупинимося докладніше на розв'язанні першої задачі. Відомо, що внаслідок нелінійності амплітудної характеристики в приймачах виникають інтермодуляційні завади. Найбільшу шкоду якості зв'язку завдають інтермодуляційні складові третього та п'ятого порядку, які також називають міжканальними завадами. Ці завади можуть суттєво знизити завадостійкість усієї системи зв'язку з рухомими об'єктами навіть при великому захисному інтервалі *D*, тобто при малому рівні завад на співпадаючих частотах.

Завади через перехресну модуляцію можуть бути визначені, якщо апроксимувати нелінійну характеристику поліномом третього ступеня виду

$$U_{вих}(t)=a_1 U_{вх}(t) - a_3 U^3_{вх}(t),$$

де

$$U_{вх}(t) = A\cos\alpha(t) + B\cos\beta(t) + C\cos\gamma(t).$$

Уникнути появи взаємної модуляції третього порядку можна в тому випадку, якщо серед каналів радіозв'язку, розподілених у довільній зоні, не виявиться групи з рівними інтервалами Δf_k між носійними частотами.

Розв'язання другої задачі розглянемо докладніше. Для територіальної системи зі стільниковою структурою є значна кількість алгоритмів розподілу частотних каналів між базовими станціями. Розглянемо фіксований розподіл каналів, за якого вони можуть бути використані тільки у певних осередках. Така система розподілу каналів має недоліки. Наприклад, маємо

дві сусідні чарунки з фіксованими каналами. Якщо в будь-який момент виявиться, що всі канали однієї з чарунок зайняті, а надходить запит на зв'язок саме в цій чарунці, то цей новий запит буде відключений, навіть якщо в цей самий час будуть вільні канали в сусідній чарунці. У результаті - нераціональне використання каналів.

Розглянемо схему динамічного розподілу каналів, в якій відсутній однозначний зв'язок між чарунками системи і каналами. Канали розподіляються для тимчасового використання в чарунках протягом сеансу зв'язку. Після закінчення сеансу зв'язку канали звільнюються і знаходяться в центральному фонді. Щоб уникнути інтерференції каналів, що трапилось би у результаті використання в двох суміжних чарунках того ж самого каналу одночасно, будь-який канал, що використовується в одній чарунці, може виділятись і на іншу чарунку, якщо відносна відстань між двома чарунками

$$Q = D/R \geq q_{\text{мін доп}},$$

де R – радіус чарунки;

D – відстань між центрами двох чарунок, що використовують той же канал;

$q_{\text{мін доп}}$ – мінімально необхідна відносна відстань.

Для малих ймовірностей відмов динамічна система більш ефективна ніж система фіксованого розподілу каналів.

При розв'язанні третьої задачі визначаються місця розташування базових станцій та необхідне рознесення частот між ними, а також уточняються результати розрахунків після отримання даних про виміряний рівень сигналу.

Для оптимального розташування системи базових станцій необхідно знати середній рівень сигналу, який випромінюється з місць можливого розташування базових станцій, у будь-якому місці розташування рухомого об'єкту аж до відстаней, далі яких зазначені сигнали вже не приводять до взаємних завад. Інформація про рівень сигналів може бути отримана в результаті вимірів або прогнозування.

Метою оптимізації розташування базових станцій є мінімізація їхньої кількості, необхідної для обслуговування визначеного числа каналів у межах заданої області. У місці розташування базових станцій може бути задано декілька зон обслуговування за рахунок використання направлених антен, що дає додаткову можливість вибору форм і розмірів зон обслуговування.

Переходячи до розрахунку характеристик системи рухомого радіозв'язку, вважаємо, що проблеми частотно-територіального планування знайшли своє рішення на попередньому етапі проектування.

Розрахунок стільникової мережі складається з визначення:

- розмірності кластера К;

- числа М секторів обслуговування в одній чарунці (М = 1 при φ = 360°; М = 3 при φ = 120° та М = 6 при φ = 60°, де
  φ – ширина ДН антен БС на рівні половинної потужності);
- числа $k_{БС}$ базових станцій, які необхідно установити на обслуговуваній території;
- радіуса чарунки R;
- потужності передавача БС $P_{пер\ БС}$;
- висоти підвісу $h_{БС}$ антени БС (висота антени мобільної станції звичайно приймається рівною $h_{МС}$ = 1,5 м).

Для розрахунку зазначених величин необхідно вибрати стандарт ССРР. Крім того, повинні бути відомі наступні параметри мережі:

F – смуга частот, що виділена згідно з планом розподілу частот для передачі сигналів у мережі;

F_k – смуга частот, займана одним частотним каналом системи рухомого радіозв'язку;

n_a – число абонентів, що одночасно можуть використовувати один частотний канал (для системи GSM n_a = 8);

N_a – загальна кількість абонентів, яких повинна обслуговувати стільникова мережа;

β – активність одного абонента під час найбільшого навантаження (в Ерлангах);

$P_В$ – припустима ймовірність блокування виклику в стільниковій мережі;

ρ_0 – необхідне захисне відношення для приймачів МС;

P_t – відсоток часу, протягом якого відношення сигнал/шум на вході приймача може бути менше захисного відношення ρ_0;

S_0 – площа території, в якій планується розгорнути стільникову мережу;

α – параметр, що визначає діапазон випадкових флуктуацій рівня сигналу в точці прийому (для стільникових систем α = 4...10 дБ);

$P_{пр\ МС}$ – чутливість приймача МС;

$G_{БС}$ – коефіцієнт підсилення антени БС.

Для визначення необхідної розмірності кластера К при заданих значеннях ρ_0 і P_t використовують співвідношення

$$P(\text{К})=[\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{X_1}^{\infty}\exp(-x^2/2)dx]100, \qquad (7.1)$$

де P(К) – відсоток часу, протягом якого відношення сигнал/завада на вході приймача МС буде нижче захисного відношення ρ_0.

Інтеграл (7.1) являє собою табульовану Q-функцію (Додаток 3 [11])

$$Q(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{X_1}^{\infty}\exp(-t^2/2)dt \qquad (7.2)$$

Нижня межа цього інтеграла має наступний вигляд

$$X_1=\frac{10\lg(1/\beta_e)-\rho_0}{\alpha_e}, \qquad (7.3)$$

де

$$\beta=\left(\sum_{i=1}^{l}\beta_i\right)\exp\left[\frac{\gamma^2\left(\alpha^2-\alpha_e^2\right)}{2}\right], \qquad (7.4)$$

$$\alpha_e^2=\frac{1}{\gamma^2}\ln\left\{1+\left[\exp\left(\gamma^2\alpha^2\right)-1\right]\frac{\sum_{i=1}^{l}\beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{l}\beta_i\right)^2}\right\}, \qquad (7.5)$$

де $\gamma=0{,}1\ln 10$.

Коефіцієнт β_i в (7.4) являє собою медіанне значення згасання радіохвиль на *i*-му напрямку поширення. Ці коефіцієнти зворотно пропорційні четвертому ступеню відстані до джерела перешкоди.

Передбачається, що випадкові флуктуації згасання розподілені за логнормальним законом.

Значення l и β_i в (7.5) залежать від того, якого типу антени використовуються на БС – ненаправлені або секторні. Тут необхідно розглянути три випадки:

1. Якщо φ = 360° та M = 1,
   то $l = 6$ та $\beta_1=\beta_2=(q-1)^{-4}$; $\beta_3=\beta_4=q^{-4}$; $\beta_5=\beta_6=(q+1)^{-4}$;
2. Якщо φ = 120° та M = 3, то $l = 2$ та $\beta_1=(q+0{,}7)^{-4}$; $\beta_2=q^{-4}$;
3. Якщо φ = 60° та M = 6, то $l = 1$ та $\beta_1=(q+1)^{-4}$.

В усіх випадках $q = D/R = \sqrt{3K}$. При заданих ρ_0 та α для M = 1 або 3, або 6 та декількох значень K виконуються розрахунки відсотка часу зриву зв'язку P(K). Найменше значення K, для якого виконується умова $P(K) < P_t$, може бути прийнято як розмірність кластера стільникової мережі, що проектується.

Наступним кроком є визначення розмірів чарунки в проектованій мережі. Використовуючи карту, визначаємо оптимальне розташування БС (БС у центрі чарунки), змінюючи розміри чарунок і розташовуючи БС, за можливості, в найвищих місцях. Вибравши оптимальним чином місця розташування БС, можна знизити витрати на установку БС і прокладку з'єднувальних ліній.

Виходячи з умови, що чарунка повинна бути таких розмірів, щоб поверхнева щільність телефонного навантаження дорівнювала $\beta\cdot V$, можна записати, що:

$$\frac{A_c}{S_c} = \beta \cdot V, \tag{7.6}$$

де A_c – телефонне навантаження для однієї чарунки;

S_c – площа чарунки.

Площа чарунки:

$$S_c = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot R^2 \tag{7.7}$$

Знаючи обраний радіус чарунки R, можна визначити площу чарунки за формулою (7.7), а також визначити телефонне навантаження для однієї чарунки, використовуючи (7.6):

$A_c = S_c \cdot \beta V$, а далі

$$A_c = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot R^2 \cdot \beta V. \tag{7.8}$$

Визначивши A_c, знаходимо за таблицею ймовірностей втрат на повнодоступному пучку ліній (Додаток 2 у [11]) кількість каналів, необхідних для обслуговування визначеного телефонного навантаження.

Загальна кількість фізичних каналів у чарунці

$$n_0 = n_s \cdot n_a, \tag{7.9}$$

де n_s – кількість частотних каналів, що використовуються для обслуговування абонентів в одній чарунці, визначається за формулою

$$n_s = \text{int}\left(\frac{n_k}{\text{K}}\right), \tag{7.10}$$

де int(x) – ціла частина числа x.

Значення n_k у формулі (7.10) визначає кількість частотних каналів, виділених для передачі сигналів у стільниковій мережі

$$n_k = \text{int}\left(\frac{F}{F_k}\right). \tag{7.11}$$

Визначимо кількість БС на території обслуговування

$k_{\text{БС}} = S_0/S_c$, тобто

$$k_{\text{БС}} = \text{int}\left(\frac{S_0 \cdot \beta V}{A_c}\right). \tag{7.12}$$

Знайдемо середнє значення кількості абонентів, що обслуговуються однією БС:

$$N_{\text{БС}} = \text{int}\left(\frac{N_a}{k_{\text{БС}}}\right). \tag{7.13}$$

Зараз ми маємо всі необхідні дані, щоби розрахувати необхідну потужність передавача БС $P_{\text{пер.БС}}$ при вибраних висотах антен $h_{\text{БС}}$, для чого скористаємося формулою Хата (так званим першим рівнянням передачі)

$$P_{\text{пр.МС}} = P_{\text{пер.БС}} + G_{\text{БС}} - 70 - 26{,}16lg(f) + 13{,}82lg\,(h_{\text{БС}}) - \\ - [45 - 6{,}55lg(h_{\text{БС}})]\,lg(R),\ \text{дБВт}, \qquad (7.14)$$

де f – середня частота виділеного діапазону частот, МГц;

$P_{\text{пр.МС}}$ – потужність на вході приймача мобільної станції, дБВт;

$P_{\text{пер.БС}}$ – вихідна потужність передавача базової станції, дБВт;

$h_{\text{БС}}$ – висота підвішування антен базової станції, м;

R – радіус чарунки, км;

$G_{\text{БС}}$ – коефіцієнт підсилення антени базової станції, дБ.

Наведена методика розрахунку дозволяє визначити всі необхідні параметри стільникової мережі рухомого радіозв’язку. При складанні повного частотного плану необхідно, знаючи кількість частотних каналів, що надані одній БС, визначити конкретні номінали частот, які будуть виділені для кожної БС одного кластера.

8 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ЗВ’ЯЗКУ З КОДОВИМ ПОДІЛОМ КАНАЛІВ (CDMA)

8.1 Види широкосмугових сигналів

З метою подолання недоліків, властивих цифровим стандартам стільникового зв’язку та розглянутих у попередніх розділах, компаніям-виробникам майже одночасно з розробкою стандартів з частотним та часовим поділом каналів довелося проводити дослідження принципово інших цифрових систем, виконаних за технологією багатостанційного доступу з кодовим поділом каналів (БДКП) або, як його називають в усьому світі, CDMA (Code Division Multiple Access), що використовує шумоподібні сигнали з розширеним спектром.

Технологія багатостанційного доступу з кодовим поділом каналів, в основі якої лежить поділ ортогональних сигналів, відома давно. В СРСР перша робота «Основи теорії лінійної селекції», присвячена цій темі, була опублікована в збірнику ЛЕІЗ ще в 1935 році, а її автором був Дмитро Васильович Агєєв. Протягом довгого часу технологія CDMA використовувалася у військових системах зв’язку, як у СРСР, так і в США, оскільки мала багато цінних для таких систем переваг, про які буде сказано нижче.

Принцип CDMA полягає в розширенні спектра вихідного інформаційного сигналу, що може здійснюватись двома методами, а саме: «стрибками по частоті» і «прямою послідовністю».

Так звані «стрибки по частоті» (або FH - Frequency Hopping) реалізуються таким способом: носійна частота під час передачі постійно змінює своє значення в деяких заданих межах за псевдовипадковим законом (кодом), індивідуальним для кожного розмовного каналу, через порівняно невеликі інтервали часу. Приймач системи поводиться аналогічно, змінюючи частоту гетеродина за точно таким же алгоритмом, забезпечуючи виділення і подальшу обробку тільки потрібного каналу. За допомогою FH сьогодні робляться спроби поліпшення технічних характеристик вузькосмугових цифрових систем стільникового зв’язку, зокрема, GSM.

Другий метод - «прямої послідовності» (або DS – Direct Sequence), який заснований на використанні шумоподібних сигналів, застосовується в більшості працюючих і перспективних систем CDMA. Він передбачає модуляцію інформаційного сигналу кожного абонента індивідуальним й унікальним у своєму роді псевдовипадковим шумоподібним сигналом (він і є в даному випадку кодом), що розширює спектр вихідного інформаційного сигналу. Слід зазначити, що кількість варіантів таких кодів досягає декількох мільярдів, що дозволяє створити персональний зв’язок у масштабах нашої планети. В результаті проведення подібної процедури вузькосмуговий інформаційний сигнал кожного користувача розширюється на всю

ширину частотного спектра, виділеного для користувачів мережі (база сигналу при цьому стає набагато більше 1). У приймачі сигнал відновлюється за допомогою ідентичного коду, в результаті чого відновлюється вихідний інформаційний сигнал. У той самий час сигнали інших передавачів для цього приймача продовжують залишатися розширеними і сприймаються ним лише як «білий шум», що є найбільш «м'якою» завадою, яка менш за все заважає нормальній роботі приймача.

При цьому забезпечується високий ступінь захисту від активних і пасивних завад, що дозволяє працювати при низьких значеннях відношень сигнал/шум (3-5 дБ). Таким чином, в одному радіочастотному каналі одночасно передаються інформаційні сигнали значної групи користувачів.

CDMA недаремно широко використовується у військових системах зв'язку, оскільки розширення спектра сигналів дозволяє протидіяти навмисним штучним завадам. Якщо розширити базу радіосигналу до дуже великих значень, то можна зробити його нижче рівня шумів, що і буде спостерігати потенційний супротивник. На приймальній же стороні вихідний сигнал буде відновлений. Таким чином, подібні системи можна використовувати, не заважаючи роботі інших радіозасобів, що використовують той же діапазон радіочастот. Однак це не застосовується в існуючих комерційних стільникових системах CDMA.

8.2 CDMA або IS-95 стандарт, розроблений компанією Qualcomm

Характерною рисою стандарту IS-95 є ширина радіоканалу 1,23 МГц. Відстань між носійними частотами в стандарті - 1,26 МГц, тобто радіоканали розміщені майже без захисного інтервалу. Діапазон робочих частот практично збігається з діапазоном, виділеним під стандарт AMPS (824-849 МГц і 869-894 МГц). Рознесення частоти передачі і прийому складає, як і в AMPS, 45 МГц. Слід нагадати, що всі стільникові системи, які працюють у діапазоні 900 МГц, історично називалися в США «cellular». Одночасно з діапазоном 900 МГц почали розвиватися аналогічні системи, які працюють у діапазоні 1890-1930 МГц і 1950-1990 МГц. Усі системи, що працюють у цьому діапазоні, називаються в США «DCS».

Процес формування шумоподібного сигналу в IS-95 значно складніший, ніж наведено вище. Реально в такій системі на кожній базовій або абонентській станції використовуються три типи псевдовипадкових послідовностей (кодів), кожна з яких виконує свою функцію: для синхронізації роботи кінцевих пристроїв радіотракту, для ідентифікації абонентських радіотерміналів і безпосередньо для передавання корисної інформації. Таким чином, псевдовипадкові послідовності – це три джерела і три складові частини технології CDMA у стандарті IS-95.

Як третій тип коду використовуються послідовності, сформовані відповідно до взаємоортогональних функцій Уолша. База функцій Уолша

складається з 64 функцій, що дозволяє реалізувати на одній базовій станції одночасну роботу 64 абонентів в одному радіоканалі. Зрозуміло, коли в мережі з'являються інші базові станції, то з'являються і додаткові завади, які зменшують динамічний діапазон сигналу і відповідно знижують кількість розмовних каналів. Реально у фіксованій системі зв'язку стандарту IS-95 реалізується до 40…45 розмовних каналів в одному радіоканалі, а в мобільній – 20…25. Остання обставина пов'язана з необхідністю резервування каналів у сусідніх чарунках для забезпечення функції так званого «м'якого» переключення («soft hand-off»).

Розмовний сигнал у такій системі перетворюється в цифровий потік зі швидкістю 8 або 13 кбіт/с. Цим займається вокодер. У системі зв'язку стандарту CDMA швидкість роботи вокодера змінюється в залежності від інтенсивності мови.

Радіоканал у системі CDMA являє собою загальний шлях, ресурси якого динамічно перерозподіляються між його користувачами, що йдуть (абонентськими радіотелефонами) подібно тому, як це відбувається, наприклад у мережах Frame Relay, а така функція дозволяє додатково збільшити ємність мережі. Ось ця алегорія загального шляху допомагає також зрозуміти ще одну фундаментальну перевагу CDMA над TDMA, де кожному корисному сигналу виділений жорстко зафіксований тайм-слот, що забезпечує, визначену пропускну здатність, але не дозволяє так легко маніпулювати ресурсами, виділеними абонентам, як в мережі CDMA.

Надто серйозне питання – це забезпечення однакових рівнів потужності, що випромінюються мобільними радіотелефонами. Тут необхідно виключити випадки, коли радіотелефони, що розташовані поблизу базової станції, «заглушають» ті, що знаходяться на відстані. Для цього використовується досить витончений алгоритм керування їхньою потужністю випромінювання з динамічним діапазоном регулювання понад 80 дБ з кроком через 1 дБ. При цьому через інтервали в 1,25 мс базова станція регулює потужність розміщених у зоні її обслуговування абонентських радіотелефонів. Це дозволяє не тільки підтримувати на одному рівні якість прийому в кожному радіоканалі незалежно від відстані абонентського радіотелефону до базової станції, але і дозволяє збільшити час роботи радіотелефону без підзарядки акумуляторів.

Передача інформації в системі здійснюється за допомогою потоку мовних пакетів, які проходять з інтервалом 20 мс. Абонентський радіотелефон CDMA має декілька демодуляторів, що дозволяє приймати рознесені сигнали при багатопроменевому розповсюдженні, а також підтримувати зв'язок з декількома базовими станціями одночасно.

У першому випадку сигнали вирівнюються в часі і складаються, що поліпшує якість прийому. Тобто те, що для FDMA або TDMA – погано (вони вибирають сигнал з найбільшим рівнем і задовольняються тільки ним), для CDMA – добре.

В другому випадку при переїзді з однієї чарунки в іншу абонентський радіотелефон, використовуючи, наприклад, два демодулятори, працює одночасно з двома базовими станціями, сигнали від яких надходять на мережний комутатор (контролер), де з обох каналів зв’язку кожні 20 мс вибирається найкращий мовний пакет. Тобто весь процес абсолютно непомітний для абонента мережі. Ось це і є «м’яке» переключення.

Зрозуміло, весь зазначений вище процес передачі корисних сигналів неможливий без надійної системи синхронізації, що забезпечується шляхом прийому сигналів радіонавігаційної Глобальної Системи Позиціонування (GPS), яка покриває всю поверхню планети за допомогою групи супутників. Приймачі GPS знаходяться на кожній базовій станції системи CDMA. Звичайно, можна було б використовувати й інші джерела синхронізації, але зазначений підхід має очевидну гнучкість, тому що сигнали GPS приймаються в будь-якій точці планети, що знімає з операторів мережі частину проблем.

8.3 Поділ сигналів різних абонентів

Характерною рисою CDMA є те, що ні часовий, ні частотний ресурси прямо між абонентами не поділяються. У найбільш розповсюдженій реалізації CDMA – IS-95 або cdmaOne, ця смуга дорівнює приблизно 1,25 МГц. Для поділу сигналів від різних радіотелефонів використовується наступна технологія:

- вибирається ансамбль сигналів, що володіють наступними властивостями:
  1. кореляція між різними сигналами з ансамблю мала;
  2. кореляція сигналу зі своєю копією (автокореляція) при ненульовому часовому зрушенні мала;
  3. нормована автокореляція при нульовому часовому зрушенні наближається до 1;
- використовуються бінарні сигнали, тобто ті, що складаються з „–1” і „1”;
- кожному абоненту присвоюється сигнал з описаного вище ансамблю (адресний сигнал або послідовність);
- інформаційний сигнал від кожного абонента перед передачею перемножується з привласненою йому послідовністю (тобто модулюється адресною послідовністю).

При прийомі витягти інформацію із сигналу, що прийшов від конкретного радіотелефону, можна лише перемноживши його повторно з адресним сигналом цього радіотелефону. Завдяки описаним вище кореляційним властивостям, легко побудувати фільтр, що виділить сигнал від конкретного радіотелефону на фоні інших.

Реальним позитивним ефектом для абонента є те, що використання досить довгих адресних послідовностей забезпечує ефективне шифрування переданої інформації. У IS-95 використовуються послідовності довжиною 2^{15} і 2^{42} символів. Ансамблі послідовностей утворюються шляхом циклічного зсуву.

8.4 Фактор мовної активності і керування потужністю

Оскільки всі абоненти працюють в одній смузі частот, а при прийомі сигналу від конкретного абонента сигнали від інших розглядаються як шум, необхідно максимально знизити рівень цього шуму. При цьому можливі два способи, і вони застосовуються в cdmaOne:

- відпрацьовування фактора мовної активності, зміст якого полягає в тому, що в періоди мовчання абонента в сеансі зв'язку (35-40% загального часу) знижується швидкість передавання мови і випромінювана потужність;
- примусове регулювання потужності, що випромінюється радіотелефоном завдяки тому, що базова станція періодично (кожні 1,25 мс) змінює потужність передавачів працюючих з нею радіотелефонів до мінімально необхідної для впевненого прийому.

8.5 М'яка передача обслуговування

Два з уже розглянутих принципів системи CDMA, а саме, використання однієї носійної частоти всіма абонентами і багатоканальний прийом, наділяють систему ще однією дуже важливою властивістю. Справа в тому, що радіотелефон одночасно може працювати з декількома (до 3) базовими станціями. По-перше, це поліпшує якість зв'язку в зоні невпевненого прийому на межах чарунок. По-друге, забезпечує можливість так званої м'якої передачі обслуговування, тобто переміщення абонента з зони дії однієї БС у зону дії іншої без переключення на іншу носійну і розриву зв'язку. Це дає помітне поліпшення якості зв'язку в зонах, де висока щільність абонентів і використовуються чарунки малого радіуса.

8.6 Мобільність у CDMA

Перші стандарти CDMA - IS-95 та cdmaOne, розроблені як стандарти рухомого зв'язку, часто використовують слово «mobile», а наступні розробки широкосмугових стандартів типу W-CDMA і cdma2000 ще більше пристосовані до мобільного зв'язку. До того ж, саме технологія CDMA дозволяє здійснювати найбільш якісне і непомітне для абонента переключення при переміщенні абонента між чарунками (так назване «м'яке» пере-

ключення або soft hand-off), що так цінується компаніями-операторами й абонентами.

Тут слід зазначити ключову роль механізму hand-off як невід’ємного механізму забезпечення працездатності мережі технології CDMA (при використанні інших технологій режим hand-off може як мати місце, так і бути відсутнім, перетворюючи «рухому» стільникову мережу в «фіксовану»). Як відомо, внаслідок відсутності цих механізмів у системі CDMA суттєво зменшується ємність мережі і якість обслуговування абонентів , погіршується екологічність і підвищується витрата ємності батарей абонентського радіотелефона.

Саме hand-off, власне кажучи, і забезпечує можливість роботи окремих базових станцій і секторів базових станцій стільникової мережі технології CDMA на одній і тій же частоті. Тільки для випадків будівництва “ізольованих” одна від одної односекторних базових станцій, у далеко, на десятки кілометрів, розміщених один від одного населених пунктах, можна було б працювати без механізму hand-off. Але для таких випадків, звичайно ж, немає ніякого сенсу використовувати технологію CDMA, оскільки тут можуть бути використані більш ефективні рішення, засновані на більш простих технологіях. Слід помітити, що при розгортанні мереж CDMA у регіонах з високою і середньою щільністю абонентів в умовах міської і сільської забудови (де необхідно використовувати більше однієї базової станції), перекриття їхніх зон обслуговування просто неминуче. При цьому для значної частини абонентів, особливо розташованих на середніх і верхніх поверхах будинків, малоймовірно точно визначити, від якої базової станції в це місце прийде найбільший сигнал, рівень якого, до того ж, залежить від змін навколишнього середовища. Тому “тверде закріплення” абонента тільки за даною базовою станцією, що те ж саме як і “скасування” механізму hand-off, привело б до зниження ємності, якості і надійності зв’язку в мережі технології CDMA. Слід зазначити, що стільники мережі CDMA «дихають» у залежності від розміщення абонентів, які обслуговуються, а в цьому випадку частина найбільш віддалених від центру абонентів може «випасти» із зони обслуговування однієї базової станції і не буде підхоплена сусідньою, а це – порушення надійності зв’язку.

Якщо скасувати функцію hand-off, то сигнали від сусідніх базових станцій мережі CDMA будуть не допомагати прийому, поліпшуючи співвідношення сигнал/шум, а створювати конкретну додаткову перешкоду. А одночасна робота з декількома базовими станціями робить взагалі несуттєвою перешкодою сам факт переміщення між чарунками. Проте в мережах інших стандартів процес передачі виклику від чарунки до чарунки є не завжди якісним, у результаті чого відбувається погіршення якості або навіть переривання зв’язку. Справа в тому, що центр комутації стільникової мережі підтримує зв’язок (з’єднання) тільки між однією базовою станцією й абонентом. Коли ж абонент починає переміщатися в сусідню чарунку,

центр комутації організовує новий канал зв’язку через сусідню базову станцію й у певний момент часу (при заданому співвідношенні рівнів сигналів від сусідніх базових станцій) приймає рішення про переключення каналів (так назване «тверде переключення» або «hard hand-off»). Незручність тут у тому, що лінія зв’язку з однією базовою станцією розривається до того, як установиться нова лінія зв’язку з іншою базовою станцією. В результаті протягом деякого інтервалу часу абонентський радіотелефон не зв’язаний з жодною базовою станцією. Іноді абонентський радіотелефон перекидається базовими станціями як тенісний м’ячик. Ось цей момент звичайно відчутний абонентом у вигляді короткочасної (або не дуже) завади, шуму, а іноді він закінчується й обривом зв’язку. Для виключення таких ситуацій розроблювачі стільникових систем зв’язку змушені докладати додаткові зусилля і кошти.

9 ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ СИСТЕМ СТАНДАРТУ CDMA

9.1 Переваги стандарту CDMA

9.1.1 Перелік переваг

До основних переваг відносяться:

- висока якість голосового зв’язку, порівнянна з якістю передавання голосу в цифрових проводових лініях зв’язку. Якість голосового зв’язку у радіоканалі CDMA переважає за якістю інші види стільникового зв’язку;
- висока конфіденційність зв’язку, яка дає змогу вести телефонні розмови й передавати данні, не побоюючись прослуховування чи перехоплення з боку сторонніх осіб. За цим показником CDMA переважає радіоінтерфейси інших систем стільникового зв’язку;
- більш ефективне використання частотного спектра;
- практично не потребує частотного планування;
- найбільша серед усіх систем стільникового зв’язку пропускна здатність базових станцій , що забезпечує 70…90 одночасних розмов у чарунці з однією базовою станцією. За цим показником CDMA переважає GSM у 5-7 разів, а D-AMPS у 8-10 разів;
- можливість отримання великої (радіус до 50 км) зони радіопокриття від однієї базової станції, яка значно переважає зону покриття базових станцій інших стандартів і забезпечує суцільне покриття при значно (у 3-5 разів порівняно з GSM-900) меншій кількості базових станцій;
- можливість установлення телефонного зв’язку в будь-якому місці, тобто незалежно від кабельних систем;
- підвищена екологічна безпека абонентських радіотелефонів CDMA, вихідна потужність яких залежно від відстані до базової станції постійно змінюється, установлюючись у кожний момент часу мінімально необхідною для зв’язку. За цим показником радіотелефон CDMA називають у світі „зеленим телефоном”;
- триваліший строк роботи акумуляторної батареї;
- кількість відмовлень у 10-15 разів менше, ніж у проводовій телефонній мережі;
- абонентський радіотелефон CDMA – це не просто радіотелефон для голосового зв’язку, а й багатофункціональний пристрій, який дає змогу передавати дані між комп’ютерами, цифрові та аналогові факси, а також забезпечувати доступ до Інтернет. Швидкість передавання даних у мережі CDMA вже сьогодні становить

14,4 кбіт/с, що перевищує аналогічний показник в стільникових мережах інших стандартів;

- на порядок вищий темп введення в експлуатацію і менша трудомісткість робіт, ніж у проводовій мережі та інших стільникових стандартах;
- малий строк окупності системи (1,5-3 роки);
- капітальні витрати менше в 1,5-2 рази порівняно з іншими технологіями зв'язку зі значно меншою кількістю чарунок (базових станцій), необхідних для покриття території. Крім того, широкосмугові сигнали при розповсюдженні у місті менше підпадають під вплив вузькосмугових швидких завмирань, що робить зв'язок більш стійким;
- простота та гнучкість технічних рішень при розширенні мережі та переходу до системи зв'язку третього покоління.

Використання методу розширення спектра дозволило вирішити дві основні технічні проблеми, які стоять перед наземними стільниковими мережами – залежність взаємних завад від численних користувачів і багатопроменевого поширення радіохвиль. Рішення першої проблеми здійснюється завдяки перетворенню сторонніх сигналів у шум, а його вплив усувається легко за допомогою цифрової демодуляції і декодування з корекцією помилок. Друга проблема також вирішена і відбиті сигнали, прийняті як копії вихідного сигналу, але з різною часовою затримкою, додаються, поліпшуючи якість прийому.

У системі зв'язку CDMA не потрібно ніякого частотного планування, оскільки сусідні чарунки можуть використовувати ті самі радіочастоти. Цей самий фактор дозволяє здійснювати непомітну для абонента плавну передачу («м'яке переключення») виклику від чарунки до чарунки, забезпечуючи одночасний зв'язок абонентського радіотелефону із двома і навіть трьома базовими станціями.

Для пристосування такої методики до мереж зі значною кількістю передавачів необхідно забезпечити оперативне і точне керування потужністю всіх абонентських радіотелефонів, щоб найбільш віддалені від базової станції радіотелефони не «забивалися» радіотелефонами, що знаходяться близько. У стільниковій системі зв'язку CDMA використовується досить складний алгоритм керування потужністю передачі, що дозволяє не тільки підтримувати на одному рівні якість прийому незалежно від відстані абонентського радіотелефону до базової станції, але і додатково збільшити час роботи радіотелефону без підзарядки акумуляторів. А це досить приємно для користувачів. Тобто, технологія CDMA використовує саме такий мінімальний рівень сигналу, що необхідний для забезпечення якісного прийому. І не більш того.

Реально виходить, що радіообладнання CDMA працює на рівнях випромінюваної потужності в 100-1000 разів менше тих, на яких працює радіообладнання інших технологій.

Зрозуміло, що зона обслуговування базової станції CDMA може мати значні розміри і визначається вона відстанню дії саме абонентських радіотелефонів. Слід згадати, що, наприклад, технологія TDMA на значних відстанях може підвести, оскільки за таких умов через відбиття сусідні кадри сигналу можуть накластися один на одного, що порушить зв’язок. Тому тут кращі відстані до 20 км, тоді як звичайне обладнання CDMA таких обмежень не має. Наприклад, у GSM цей ефект усувають застосуванням спеціальних алгоритмів обробки сигналу, що дозволяє збільшити відстань зв’язку до 35 км.

Раніше вже зазначалося про високі завадостійкі властивості сигналу CDMA. Зрозуміло, що чим ширше база сигналу, тим краще показники цього параметру. Наприклад, вузькосмугова завада, що може зіпсувати роботу радіоканалу FDMA і TDMA (зв’язку не буде), лише руйнує вузьку смугу частот у широкосмуговому спектрі CDMA, що приводить до часткової втрати корисної інформації, яка може бути цілком відновлена цифровим декодером на приймальній стороні.

Ще однією важливою перевагою системи CDMA є більша ефективність використання радіоспектра. Це означає, що в тому самому частотному діапазоні можна розмістити більшу кількість інформаційних каналів. Нагадаємо, що в IS-95 у смузі 1,23 МГц в умовах одиночної базової станції може передаватися до 61 інформаційних каналів (плюс 3 канали службових). Реально для фіксованого зв’язку реалізується до 40-45 (у трисекційній базовій станції відповідно 135) розмовних каналів в одному радіоканалі, а для мобільної – 20…25. Якщо порівняти ці показники з будь-якою реальною мережею будь-якого іншого стандарту, де не можна використовувати однакові частоти в сусідніх чарунках мережі і треба займатися частотним плануванням, то за всіх інших рівних умов абонентська ємність мережі CDMA виходить вище. І найбільша вона за умови обслуговування нерухомих абонентів (коли не треба резервувати канали в сусідніх чарунках).

Усі вищезгадані властивості визначають основні економічні вигоди від використання CDMA – збільшення перекриття і збільшення ємності мережі й стільників при запланованому рівні проникнення на ринок. Так, наприклад, «м’яке переключення» щонайменше вдвічі зменшує кількість базових станцій, які необхідно розгорнути, а ємність мережі технології CDMA (IS-95) при цьому більше в 3-5 разів порівняно з FTDMA (D-AMPS, GSM, DCS) і в 10-20 разів порівняно з аналоговим FDMA (AMPS, NMT).

Але тут слід сказати, що не можна однозначно говорити про те, що в технології CDMA вище абонентська ємність і завадостійкість. Інакше кажучи, це взаємовиключні характеристики. Вище одне – нижче інше. І навпаки. Проте експерименти показали, що за всіх інших рівних умов (розмір

зони обслуговування, кількість чарунок, популяція і розподіл абонентів) зазначені характеристики системи стандарту IS-95 усе-таки перевершують аналогічні існуючих стандартів технології FTDMA.

9.1.2 Підвищена екологічна безпека абонентських радіотелефонів CDMA

Екологічність абонентського радіотелефону – це те, чим нарешті серйозно затурбувалося в останні роки людство. Реальні результати масового «знайомства» людства зі стільниковим зв'язком будуть відомі ще нескоро. Тому найменший ступінь опромінення завжди більш приємний, ніж той, що більше, хоча й у межах існуючих норм. Як відомо, проведені впродовж останніх років медичні дослідження виявили факт значного збільшення ризику небезпечних захворювань мозку при використанні стільникового телефону з підвищеною потужністю випромінювання. Американський Інститут електро- і радіоінженерів розробив стандарт 802.11, що встановлює норми на характеристики мереж глобального рухомого зв'язку. Відповідно до цього стандарту потужність випромінювання портативного абонентського радіотелефону з точки зору охорони здоров'я не повинна перевищувати 10 мВт. Як відомо, паспортна максимальна потужність абонентських радіотелефонів, які використовуються у стільникових мережах стандартів NMT, GSM, AMPS/DAMPS і cdmaOne складає відповідно 3 Вт, до 2 Вт, 0,6 Вт і 0,2 Вт.

Наведений ряд максимальних потужностей потенційно відбиває найвищу чутливість приймачів. У стандарті CDMA за рахунок використання найефективніших методів обробки сигналів (когерентний прийом багатопроменевих сигналів) потужність випромінювання найменша. Що правда, для випадку стандарту GSM, потрібно ввести поправку на більш високу швидкість передавання інформації у радіоінтерфейсі.

Однак зазначене вище максимальне значення потужності випромінювання абонентського радіотелефону cdmaOne в 200 мВт може мати місце (за рахунок дії автоматичного регулювання потужності абонентського радіотелефону щодо підтримки енергетичного балансу між прямим і зворотним каналами базової станції) тільки у випадку максимальної дозволеної потужності передавача базової станції (20 Вт), за відсутності рознесеного прийому на базовій станції і без урахування енергетичного виграшу за рахунок механізму hand-off для абонентів на краю зони обслуговування. Разом з тим, відповідно до нормативних документів Укрчастотнагляду (УЧН), припустима потужність випромінювання базових станцій технології CDMA знижена відносно максимально можливої в 2,5-10 разів за різними регіонами. Реально, з урахуванням застосування на всіх базових станціях мережі технології CDMA рознесеного прийому (що в «релеївському» каналі дає виграш у 3-5 разів по потужності), а також, приймаючи до уваги

додатковий енергетичний виграш у 4 дБ (2,5 рази) для абонентів на краю зони обслуговування (в них-то саме потужність передавача максимальна) за рахунок дії механізму hand-off, маємо, що навіть максимально необхідна потужність випромінювання абонентського радіотелефону технології CDMA при будь-якій зоні обслуговування не перевищує припустимої медичної норми 10 мВт, а саме: 200 мВт: 2,5 : 4 : 2,5 = 8 мВт. Як відомо, найбільше опромінення абонента буде спостерігатися на краю зони обслуговування, оскільки при наближенні до базової станції потужність випромінювання абонентських радіотелефонів автоматично знижується (правда, у різних межах і з різним кроком).

Разом з тим, відомо, що необхідне для якісної роботи системи типове відношення сигнал/шум на прийомі базової станції складає 6 дБ, 9 дБ і 16 дБ відповідно для стандартів cdmaOne, GSM, DAMPS. Оскільки стандарти GSM і DAMPS не підтримують режим soft hand-off і отже не мають виграшу в 4 дБ для абонентів, що знаходяться на краю зони обслуговування, а на їхніх базових станціях застосовується рознесений прийом, максимальні потужності абонентських радіотелефонів для цих стандартів будуть відповідно в 5 і 25 разів більше, ніж в абонентських радіотелефонах cdmaOne. Відзначимо, що при цьому ще не враховане зростання максимальної потужності абонентських радіотелефонів цих стандартів через роботу базових станцій з максимальною штатною потужністю, а не зниженою в 2,5 рази, як це має місце в cdmaOne. В порівнянні з абонентськими радіотелефонами стандарту NMT виграш ще більш вражаючий.

Таким чином, виходить, що тільки абонентські радіотелефони технології CDMA (у нашому випадку це cdmaOne) забезпечують виконання необхідних медичних норм по максимально-допустимій потужності випромінювання незалежно від радіуса зони обслуговування базових станцій стільникової мережі зв’язку.

9.1.3 Конфіденційність зв’язку

Конфіденційність зв’язку і скритність зв’язку у технології CDMA найбільша з усіх технологій рухомого зв’язку. Це обумовлено типом використовуваного радіосигналу з широкою базою $D = BT = 100$, де D – база або коефіцієнт стиснення сигналу, B (МГц) – смуга сигналу cdmaOne в ефірі, а T (мксек) – тривалість інформаційної посилки. Знайти сам факт наявності такого сигналу спеціальними засобами в ефірі набагато складніше, ніж “простих” вузькосмугових сигналів, які використовуються у стандартах GSM, DAMPS, NMT, оскільки спектральна щільність потужності сигналу cdmaOne в ефірі на виході на 20 дБ нижче при рівних швидкостях передачі інформації і потужностях передавачів. Слід за одним заходом зазначити, що саме завдяки використанню такого «широкобазового» сигналу в радіоінтерфейсі технології CDMA забезпечується максимальна надійність

зв'язку в умовах багатопроменевих завмирань порівняно з технологіями стандартів GSM, DAMPS, NMT.

Найвища конфіденційність зв'язку обумовлена багатоступеневимим кодуванням, розшифровка якого потребує декількох років наполегливої праці. Так, якщо сигнали аналогових стандартів можна прослухати найпростішими вимірювальними приймачами, які вільно продаються в магазинах, то для прослуховування з ефіру сигналів стандартів GSM і DAMPS поставляється вже більш сучасна апаратура радіоконтролю .

Що стосується виділення з ефіру сигналів технології CDMA, то через їх підвищену криптостійкість і скритність під шумами ця задача є дуже складною. Цікаво, що сукупність таких властивостей, як криптостійкість, завадостійкість і завадозахищеність у поєднанні зі зниженою витратою ємності акумуляторної батареї пояснює зацікавленість у застосовуванні технології CDMA для потреб силових структур і відомств.

9.1.4 Ефективність використання спектра

Технологія CDMA має цілий ряд фундаментальних переваг, що і обумовили стійкий інтерес до неї, у першу чергу, з боку військових фахівців, перших хто почав її застосування як у СРСР, так і в США. Зокрема, деякі системи CDMA здатні працювати під рівнем шумів, заважаючи не тільки можливості перехоплення інформації, але, навіть, визначенню самого факту наявності її передавання. Повертаючись до комерційних радіотелефонних систем CDMA, слід зазначити, що з моменту прийняття в США у 1993 р. першого стандарту IS-95 багато фундаментальних властивостей технології CDMA, цікавих при масовому обслуговуванні абонентів, перейшли з чисто теоретичної площини в практичну.

Отже, у першу чергу, до унікальних властивостей технології CDMA, що цікавить операторів, відноситься максимальна з усіх існуючих технологій рухомого зв'язку 2G ефективність використання радіоспектра (Ерл/МГц кв.км). По цьому досить важливому показнику системи стандарту cdmaOne перевершують цифрові системи на базі технології FTDMA: GSM – у 3 рази, DAMPS – у 5 разів, не кажучи вже про аналогові системи на базі технології FDMA: AMPS – у 15 разів. Чи слід говорити, що в умовах обмеженого частотного ресурсу, що спостерігається не тільки в Росії (де історично пріоритет мають засоби зв'язку спеціального і військового призначення, а цивільні системи зв'язку часто працюють на вторинній основі), економія радіочастотного природного ресурсу сприяє зниженню витрат на розгортання мереж і створенню передумов для зниження тарифів.

9.1.5 Мережне планування

Мережа CDMA, де всі базові станції працюють на тих самих радіоканалах, не схожа на мережі інших технологій і функціонує як єдиний організм. На практиці три основних параметри стільникової мережі, а саме покриття, якість і ємність, у системі CDMA взаємозалежні і впливають один на одного. Таким чином, оператори мають можливість забезпечення оптимальним обслуговуванням заданої території, варіюючи параметри мережі.

9.1.6 Розподіл радіочастот

Для великої території України і малої густоти населення найбільш ефективним діапазоном побудови стільникових мереж зв'язку є діапазони 800 МГц і 900 МГц (DAMPS, cdmaOne, GSM), а частотні діапазони 1,8 ГГц (GSM) і 2,1 ГГц (3G) менш вигідні, і можуть використовуватися лише у великих населених пунктах, забезпечуючи підтримку по навантаженню вже існуючим мережам діапазонів 800 МГц і 900 МГц.

Можливе використання діапазону 800 МГц і подальший розвиток у цьому діапазоні найбільш ефективної технології стільникового зв'язку CDMA, наприклад, шляхом еволюційного розвитку до стандарту третього покоління cdma2000 через поетапні модифікації 1XRTT і 3XRTT, що припускають підвищення швидкості передавання даних з 144 кбіт/с до 2 Мбіт/с відповідно на одному з трьох каналів CDMA шириною 1,23 МГц. Тим більше, що такий розвиток відповідає останнім рішенням МСЕ.

Технічні досягнення в області оптимальних методів оброблення інформації і підвищення ефективності використання спектра вже сьогодні дозволяють передавати 2,5 Мбіт/с і навіть 5 Мбіт/с у смузі одного частотного каналу шириною 1,23 МГц (наприклад, технічні пропозиції Qualcomm за технологією HDR і Motorola/Nokia за технологією 1XTREME).

Як відомо, з офіційно виділеного відповідними рішеннями ДКРЧ для будівництва мереж технології CDMA у Росії частотного діапазону 828-831МГц / 873-876 МГц, операторами використовується (а точніше виділений їм державною службою нагляду) лише один частотний канал шириною 1,23 МГц, а другий частотний канал у дозволеному діапазоні пустує. Для порівняння зазначимо, що, наприклад, у Московському регіоні стандарт технології AMPS-DAMPS займає смугу від 7 до 10 МГц, а стандарт технології GSM – у цілому не менш 12 МГц і при цьому більше немає жодної вільної ділянки спектра. Тим часом сьогодні практично всі мережі технології cdmaOne у світі використовують кілька частотних каналів шириною 1,23 МГц (звичайно не менше трьох). Ця обставина зв'язана не з тим, що стандарт технології CDMA не може розвиватися, використовуючи лише один частотний канал шириною 1,23 МГц, а з майбутнім наданням

нових послуг передавання інформації з високою швидкістю (у даний час до 144 кбіт/с, в перспективі до 2 Мбіт/с). Крім того, використання декількох частотних каналів дозволяє знизити тарифи на послуги зв’язку за рахунок зниження витрат на обслуговування меншої кількості місць установки багаточастотних базових станцій (це загальна проблема стільникових мереж зв’язку).

При цьому, незалежно від технології мережі стільникового зв’язку, заснованої на механізмах розсіювання і дифракції електромагнітних хвиль, існує мінімальна відстань між базовими станціями – мікрочарунка (приблизно 500-700 м), за якої електромагнітні хвилі між абонентським радіотелефоном і базовою станцією поширюються, переважно, в умовах прямої видимості (показник ступеня m експоненти у функції загасання електромагнітних хвиль дорівнює 2). У результаті різко підвищується рівень внутрішньосистемних завад і знижується якість зв’язку. Для випадку технології CDMA, крім того, знижується пропускна здатність каналу зв’язку. Так, наприклад, для мікрочарунки з $m = 2$ збільшення рівня внутрішньосистемних завад приводить до зниження пропускної здатності більше ніж у 2 рази порівняно з $m = 4$, що відповідає, у середньому, макрочарункам з відстанню більше 2 км між базовими станціями.

Крім зазначених негативних наслідків «невикористання» вільного частотного каналу в дозволеному діапазоні CDMA можна було б сказати про збитки, що несе держава, не одержуючи плати за вільний частотний канал і податків з тієї розширеної соціальної групи населення, що могла б бути абонентами мережі в результаті зниження цін на послуги і тим самим сприяти підвищенню економічної активності регіону.

9.1.7 Підвищення пропускної здатності мережі

Дійсно, є в технології CDMA такі корисні споживчі властивості, як можливість підвищення пропускної здатності мережі у години найбільшого навантаження (ГНН). На відміну від усіх інших технологій стільникового зв’язку 1G і 2G з жорстко фіксованою кількістю каналів «n» трафіка на кожній базовій станції, у технології CDMA кількість наданих каналів трафіка може збільшуватися ($> n$) за незначного і короткочасного зниження якості обслуговування. Так, наприклад, пропускна здатність базової станції технології CDMA може зрости не менше ніж на 15% при збільшенні кількості помилок за прийнятими кадрами з 1 до 3 %. Однак відомо, що за такого зростання кількості помилок за прийнятими кадрами якість переданої мови практично не погіршується . Тільки при зростанні кількості помилок понад 5% відзначається незначне зниження якості зв’язку. Зазначимо, що при цьому виходить збільшення пропускної здатності більше ніж на 20%.

9.1.8 Можливість інтегрування стільникових мереж різних стандартів

Одним з основних напрямків розвитку й удосконалювання техніки рухомого зв’язку є пошук нових технічних рішень щодо підвищення ефективності використання радіоспектра. Це пов’язано як з високою вартістю використовуваних смуг частот у ряді держав, так і загальною нестачею смуг частот у найбільш «вигідних» діапазонах радіочастот (у першу чергу, 800 МГц і 900 МГц).

Одним з ефективних шляхів вкладання інвестицій у розвиток рухомих мереж стільникового зв’язку 2G і 3G може стати будівництво так званих «накладених» мереж. При цьому, на тій же території (на тих же будинках і з використанням тих же антен) і в тій же робочій смузі частот можна розгорнути одночасно мережі стандартів GSM (DAMPS) і CDMA. Так, наприклад, при будівництві накладеної мережі стандарту CDMA на мережу стандарту GSM (займана смуга частот близько 5 Мгц, кількість носійних на базовій станції – 3, коефіцієнт повторення частот – 9) можливий виграш у пропускній здатності не менше, ніж у 2-3 рази. Ефект досягається, у першу чергу, за рахунок вже згадуваної «широкобазовості» ($D >> 1$) використовуваних складних сигналів CDMA, що забезпечують знижену спектральну щільність потужності випромінюваних сигналів і можливість режекції ділянок спектра, зайнятих сигналами GSM, на передавачах і приймачах радіозасобів мережі CDMA. Крім того, вже закладені в обладнання технології CDMA 3G нові методи обробки сигналів (наприклад, оптимальний прийом з компенсацією інтерференції і вінерівська фільтрація) є додатковими засобами підвищення ефективності роботи накладених мереж.

З огляду на загальну зацікавленість і економічну вигоду при використанні накладених мереж і готовність техніки для їхньої реалізації, представляється можливим побудова таких мереж на базі нових версій обладнання технологій GSM (2G) і CDMA (3G) з опціями для накладених мереж. При цьому, наприклад, використовуване раніше устаткування стандарту GSM оператор може перенести в інше місце мережі, де навантаження менше. Втім, такий шлях розвитку найбільш доцільний для тих виробників обладнання, що випускають техніку відразу декількох стандартів і поколінь рухомого зв’язку.

Історично склалося так, що європейці найбільш докладно розробили різні додатки (у сфері додаткових послуг) для стандарту GSM (але це відноситься більше до функцій комутатора, а не радіоінтерфейса). І ось 20 лютого 1998 року компанія Qualcomm оголосила про успішне закінчення іспитів з британським оператором Vodafon базової станції CDMA (IS-95), включеної в центр комутації рухомого зв’язку мережі GSM. Це означає, що тепер немає нічого неможливого й існує реальна можливість

поєднати численні послуги, розроблені в рамках проекту GSM і адаптовані до європейських телефонних мереж, з перевагами радіоінтерфейса IS-95.

9.2 Недоліки стандарту CDMA

9.2.1 Завада цифровому ТБ

Що стосується перспективи використання діапазону 800 МГц для потреб цифрового телебачення, для чого намічено поступово звести нанівець мережі cdmaOne і AMPS/DAMPS, то слід зазначити наступне:

1 В Україні практично весь діапазон, на первинній основі, зайнятий у даний час радіоелектронними засобами (РЕЗ) військового і спеціального призначення, що відзначено, до речі, в документах МСЕ. При цьому електромагнітна сумісність (ЕМС) між РЕЗ військового і спеціального призначення і РЕЗ цифрового телебачення не забезпечується практично в усьому діапазоні 800 МГц. У той же час, переведення РЕЗ військового і спеціального призначення за межі діапазону 800 проблематично через неминучі величезні матеріальні витрати.

2 Один канал цифрового ТБ займає смугу 8 МГц. Весь виділений діапазон для розміщення основних і резервних каналів цифрового ТБ простирається від 470 до 862 МГц. Таким чином, смуга, займана в цьому діапазоні мережами стандарту cdmaOne, складає всього 1,23 МГц. Максимальна смуга, що може знадобитися стандарту cdmaOne для забезпечення, наприклад, у повному обсязі послуг зв'язку 3G за еволюційного шляху розвитку складає не більше $3 \cdot 1{,}23$ МГц, тобто один телевізійний канал.

Отож очевидно, що чи є в діапазоні 800 МГц один або навіть цілих 3 радіоканали cdmaOne або їх немає зовсім – цифровому ТБ від цього не легше. Навіть на один ТВ канал частот не вистачить. Такими чином, збереження і розвиток у наведених обмежених рамках у діапазоні 800 МГц стандарту cdmaOne практично не може стримувати розвиток в Україні цифрового ТБ. Скоріше, воно саме себе стримує, тому що має на увазі заміну обладнання як телевізійних радіопередавачів, так і в усіх абонентів. Адже власникам дециметрових ТВ каналів з технічної точки зору і зараз нічого не заважає перейти на «цифру» і передавати у смузі 8 МГц замість однієї відразу 4 або більше високоякісних ТВ програм.

9.2.2 Завади мережі cdmaOne мережам GSM

Якщо такі факти і є, то проблеми як такої немає. У процесі комерційної експлуатації стільникових мереж технології cdmaOne дійсно були виявлені випадки впливу позасмугових випромінювань окремих передавачів базових станцій cdmaOne «Сонет» на прийомні тракти базових станцій технології GSM у діапазоні вище 890 МГц за близького територіального

розташування антен обох систем. У результаті проведених досліджень була з’ясована причина впливу обладнання CDMA і оператори мереж cdmaOne установили на виходах передавачів базових станцій додаткові смугові фільтри для зниження рівня позасмугових випромінювань на 45 дБ. Після установки таких фільтрів (це не занадто дорогий захід) впливи завад з боку мереж технології CDMA на приймачі технології GSM цілком зникли, про що, зокрема, свідчить протокол, підписаний керівництвом ЗАТ „МТС” і ВАТ “Персональные коммуникации” (Росія).

Для усунення подібних явищ у майбутньому, в нових постачаннях базових станцій cdmaOne установлений спеціальний дуплексер, що забезпечує необхідне придушення позасмугових випромінювань спектра на частотах роботи стандарту GSM (понад 890 МГц). Таким чином, сьогодні не існує ніяких технічних перешкод для забезпечення ЕМС РЕЗ cdmaOne з РЕЗ силових структур і цивільних засобів.

10 ПОСЛУГИ В МЕРЕЖАХ ЗВ’ЯЗКУ СТАНДАРТУ CDMA ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕРЕЖ

10.1 Основні послуги мережі:

- надання прямого міського телефонного номера за 1 день в місті та 50-ти кілометровій приміській зоні;
- телефонний номер, який не треба змінювати при переїзді;
- усі види послуг зв’язку: міський, міжміський, міжнародний зв’язок;
- вихід в Інтернет без необхідності купівлі додаткового обладнання (модема);
- передавання даних і факсових повідомлень;
- можливість надання будь-якої кількості телефонних номерів;
- надання технічних умов для телефонізації об’єктів (будівельних майданчиків, АЗС, магазинів і т.д.);
- широкі можливості системи по роботі з різноманітними видами міні-АТС;
- телефонізація: офісів і організацій, квартир, дач і приватних будинків, будь-яких тимчасових і рухомих об’єктів (будівельні майданчики, рухомі виставки тощо).

10.2 Додаткові послуги мережі:

- інформаційні служби (сервісне обслуговування, довідкова інформація, термінова юридична допомога);
- Інтернет;
- передача даних та факсимільних повідомлень;
- повідомлення про новий виклик;
- очікування виклику, утримання лінії;
- конференц-зв’язок;
- переадресація виклику;
- передача виклику;
- будильник;
- повторюваний таймер;
- скорочене набирання номера;
- визначення номера (АВН);
- доставка рахунків кур’єром;
- програмування номера за декількома адресами;
- інше.

Можна довго говорити про переваги тієї або іншої технології, але для комерційного телекомунікаційного оператора дуже важливим є набір послуг, за які абонент буде платити гроші. Головною перевагою мереж CDMA є дуже висока якість передачі мови, а це головна послуга всіх телефонних мереж.

У системах стандарту IS-95 використовуються вокодери з максимальними швидкостями передавання 8 кбіт/с і 13 кбіт/с. Відповідно може здійснюватися і передавання даних зі швидкостями відповідно 9,6 кбіт/с і 14,4 кбіт/с. Отже, остання цифра недосяжна в мережах інших стандартів.

Законний інтерес викликають способи доступу в мережу Інтернет через стільникові мережі IS-95. Абонент мережі CDMA може одночасно розмовляти по стільниковому телефону і працювати на підключеному до нього комп’ютері в Інтернеті. Серед існуючих сьогодні стандартів для мобільного зв’язку найкращі позиції тут саме в IS-95 унаслідок забезпечення найбільшої швидкості доступу (14,4 кбіт/с). І компанії-виробники обіцяють незабаром збільшити і цю швидкість.

Звичайно, абоненти зможуть обмінюватися факсимільними повідомленнями і спілкуватися по електронній пошті. А в доступному для огляду майбутньому очікується поява швидкостей передавання 64 кбіт/с і навіть 144 кбіт/с.

Що ж стосується різних додаткових послуг, що надаються абонентам цифрових стільникових мереж (переадресації викликів, голосова пошта, визначення номерів, послуги IN і т.п., включаючи роумінг), то усі вони визначаються мережним комутаційним обладнанням (контролером або центром комутації) і не залежать від типу використовуваного радіоінтерфейсу. Що закладено розроблювачами в комутатор, те і вийде (головне, щоб можна було установити на нього додаткове програмне забезпечення). Загалом, що оператор порахував необхідним закупити для своєї мережі (на основі, наприклад, маркетингових досліджень), тим абоненти і зможуть скористатися. І якщо чогось зараз немає, то це цілком можливо докупити і пізніше.

10.3 Стан, прогнози і перспективи розвитку мереж стільникового зв’язку у світі

Протягом декількох останніх років відбувається бурхливий розвиток послуг стільникового зв’язку в усьому світі. Це не випадково: в умовах зниження за різних причин інвестиційної привабливості традиційних послуг зв’язку об’єктом уваги інвесторів стали, зокрема, мережі стільникового зв’язку.

Компанія Qualcomm, розробивши новий стандарт і зразки обладнання, привабила багатьох розроблювачів і виробників радіообладнання, а вже ті розгорнули революційну агітацію. І в результаті багато операторів (на-

самперед, у США, Кореї і Канаді) швидко усвідомили те, про що їм говорили ще кілька років тому фахівці компаній Motorola, Nortel, Lucent Technologies, Samsung, LG та ін. Весь цикл становлення систем зв'язку стандарту IS-95 від розробки до першої комерційної експлуатації зайняв рекордно малий термін - 7 років. А от системам GSM треба було на це у свій час близько 10 років. Розроблювачі комерційних систем CDMA вважають також, що якби ця технологія з'явилася трохи раніше, то й розвиток мереж відомих стандартів TDMA (GSM і DCS) був би зовсім не таким.

Мережі CDMA розвиваються в двох діапазонах частот: 800 МГц і 1900 МГц (у Кореї – 1700 МГц).

Західна Європа поки жорстко лобіює свої стандарти, тому застосування CDMA (IS-95) обмежується пілотними проектами (Німеччина, Великобританія). А ось Східна Європа, яка потребує швидкого створення сучасної інфраструктури зв'язку, вже почала впровадження таких мереж. Цим зайнялися в Польщі, Україні, Молдові і в Росії.

В результаті вже навесні 1998 р. (усього через 1,5 року розвитку) в світі нараховувалося понад 11 млн. абонентів мереж CDMA (IS-95), не кажучи вже про дуже оптимістичні прогнози.

До початку 2000 р. вони вже обслуговували понад 50 млн. абонентів (ці дані швидко застарівають), а темпи їхнього зростання за 2002 рік дали феноменальний результат – майже 160 %

Проаналізуємо успіхи мереж інших стандартів, природно цифрових. Якщо успіхи D-AMPS у глобальному масштабі все-таки скромні (тоді як AMPS – найпоширеніший аналоговий стандарт), то напевно кожний чув, що «світ вибрав GSM», і в цьому стандарті (GSM+DCS) за різними оцінками працювало до літа 1998 року 70-75 млн. абонентів в усім світі. Відмінний результат, для досягнення якого знадобилося майже 10 років. Ну що ж, динаміка розвитку мереж CDMA (IS-95) виходить ще вище. За прогнозами фахівців мережі CDMA будуть рости випереджальними темпами, але нагнати GSM усе-таки трохи не встигнуть, тому що і ті й інші в 2005-2008 ррках будуть замінятися на стільникові мережі наступного покоління (cdma2000, W-CDMA та ін.).

11 ОБЛАДНАННЯ МЕРЕЖІ СМРЗ СТАНДАРТУ CDMA, ЙОГО ФУНКЦІЇ ТА МІСЦЕ РОЗТАШУВАННЯ

Технічні вимоги до системи CDMA сформовані в ряді стандартів Асоціації промисловості зв’язку (TIA) США:

- IS-95 - CDMA-радіоінтерфейс;
- IS-96 - CDMA-мовні служби;
- IS-97 - CDMA-рухома станція;
- IS-98 - CDMA-базова станція;
- IS-99 - CDMA-служби передачі даних.

Система CDMA фірми Qualcomm розрахована на роботу в діапазоні частот 800 МГц, виділеному для стільникових систем стандартів AMPS, N-AMPS і D-AMPS. (Стандарти TIA IS-19, IS-20; IS-54; IS-55, IS-56, IS-88, IS-89, IS-90, (S-553).

Безпека або конфіденційність є властивістю технології CDMA, тому в багатьох випадках операторам стільникових мереж не буде потрібно спеціального обладнання для шифрування повідомлень.

Основні елементи мережі стільникового радіозв’язку CDMA показані на рис. 11.1.

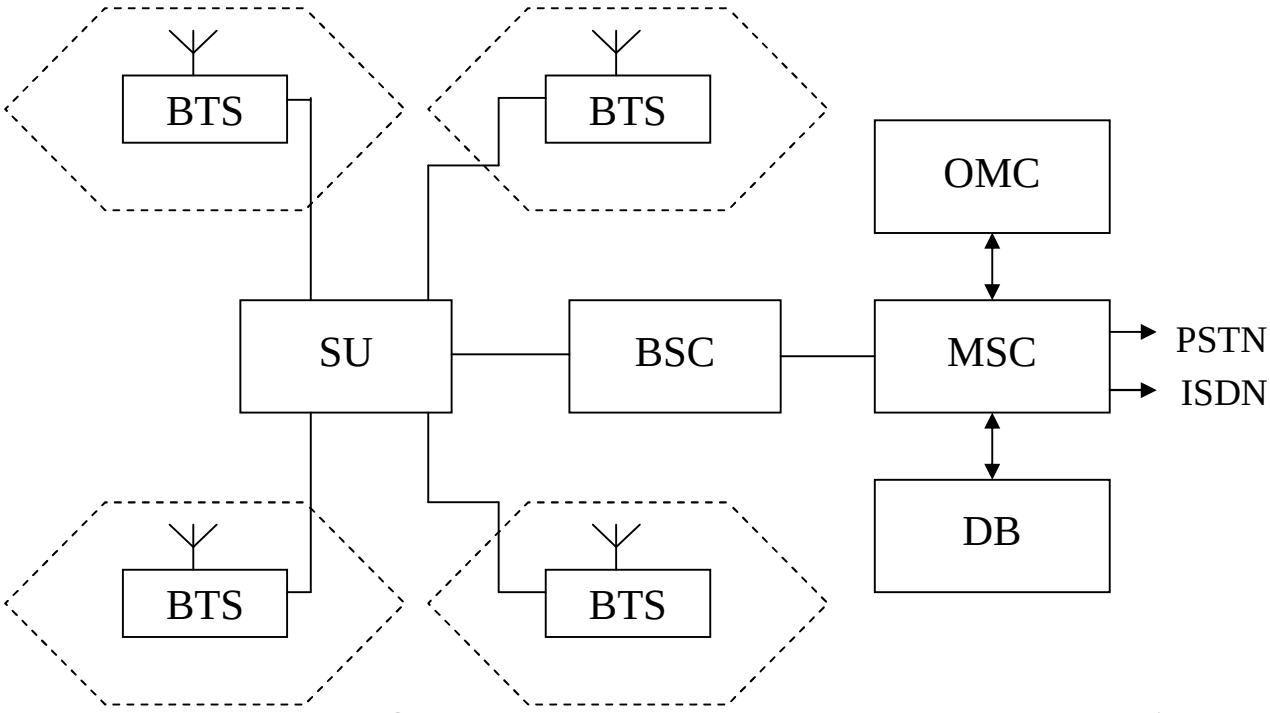

Рисунок 11.1 – Основні елементи мережі стільникового радіозв’язку CDMA

- BTS (Base Tranceiver 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 обладнання;
- MSC (Mobile Switching Centre) – центр комутації рухомого зв’язку – аналогічні тим, що використовуються в стільникових мережах з частотним (NMT-450/900, AMPS, TACS) і часовим поділом каналів (GSM, DCS-1800, PCS-1900, D-AMPS, JDC). Основна відмінність полягає в тому, що до складу КБС мережі CDMA включений пристрій оцінки якості і вибору кадрів (SU). OMC і DB включені в MSC.

Протоколи установлення зв’язку в CDMA, також як у стандартах AMPS і N-AMPS, засновані на використанні логічних каналів. У CDMA канали для передачі від базової станції називаються прямими (Forward), для прийому базовою станцією – зворотними (Reverse). Структура каналів у системі CDMA стандарту IS-95 показана на рис. 11.2.

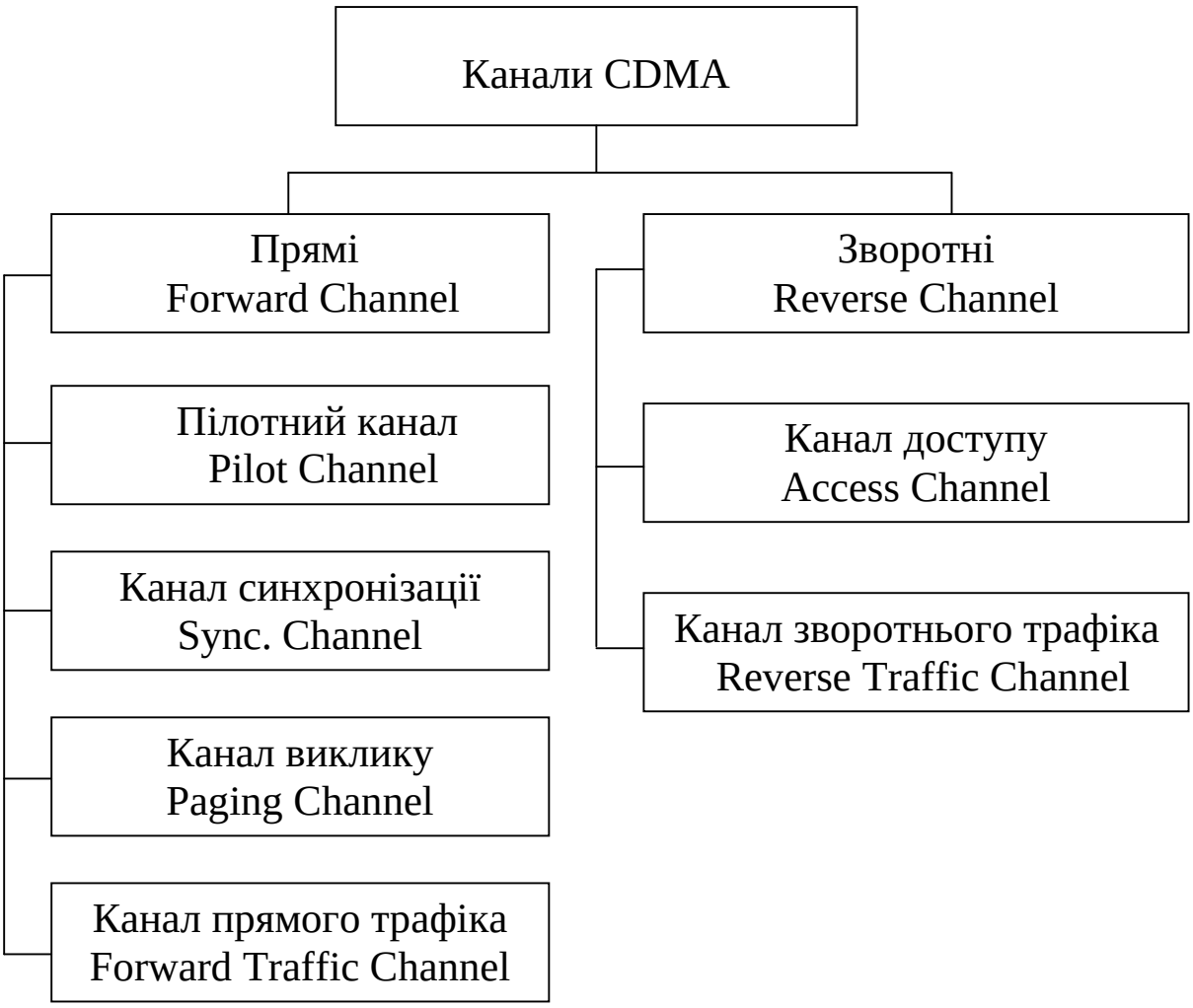

Рисунок 11.2 – Структура каналів у стандарті IS-95

11.1 Прямі канали в CDMA

Канал керування – використовується абонентською станцією для початкової синхронізації з мережею і контролю за сигналами базової станції за часом, частотою і фазою.

Канал синхронізації – забезпечує ідентифікацію базової станції, рівень випромінювання пілотного сигналу, а також фазу псевдовипадкової послідовності базової станції. Після завершення зазначених етапів синхронізації починаються процеси установлення з’єднання.

Канал виклику – використовується для виклику абонентської станції. Після прийому сигналу виклику абонентська станція передає сигнал підтвердження на базову станцію, після чого по каналу виклику на рухому станцію передається інформація про установлення з’єднання і призначення каналу зв’язку. Канал персонального виклику починає працювати після того, як абонентська станція одержить усю системну інформацію (частота носійної, тактова частота, затримка сигналу по каналу синхронізації).

Канал прямого доступу – призначений для передачі мовних повідомлень і даних, а також інформації керування з базової станції на абонентську.

11.2 Зворотні канали в CDMA

Канал доступу – забезпечує зв’язок абонентської станції з базовою станцією, коли абонентська станція ще не використовує канал трафіка. Канал доступу використовується для установлення викликів і відповідей на повідомлення, передані по каналу виклику (Paging Channel), команди і запити на реєстрацію в мережі. Канали доступу сполучаються (поєднуються) з каналами виклику.

Канал зворотного трафіка – забезпечує передачу мовних повідомлень і керуючої інформації з абонентської станції на базову станцію.

Базова станція одночасно передає 44 канали, з яких 2 канали використовуються для синхронізації, 7 – для персонального виклику (Paging), інші 35 - для передачі мовних повідомлень (Traffic).

Кодування сигналів відбувається наступним чином. У прямому каналі модуляція сигналу функціями Уолша (бінарна фазова маніпуляція) використовується для розрізнення різних фізичних каналів даної БС; модуляція довгою псевдовипадковою послідовністю (бінарна фазова маніпуляція) – з метою шифрування повідомлень; модуляція короткою псевдовипадковою послідовністю (квадратурна фазова маніпуляція двома псевдовипадковими послідовностями однакового періоду) – для розширення смуги частот і розрізнення сигналів різних БС.

Рішення останньої задачі (розрізнення сигналів різних станцій) забезпечується тим, що всі БС використовують одну і ту саму пару коротких псевдовипадкових послідовностей, але зі зсувом на 64 дискрети між різними станціями. При цьому всі фізичні канали однієї БС мають одну і ту саму фазу послідовності.

11.3 Комутатор мережі CDMA

Як комутатор мережі CDMA може використовуватися обладнання **CMX-5000** виробництва Siemens.

Технічні дані:

- CMX-5000 володіє високою готовністю (99,9994%) з повним часом простою системи 5,7 х 10^{-6} і нормою відмовлень модулів апаратних засобів ЕОМ 3% на рік;
- кількість абонентів (2G і 3G) – 1 200 000;
- кількість абонентів (3G) - 500 000;
- BHCA (Iu) - 700 000;
- BHCA (мобільний телефон) – 1 000 000;
- BHCA (транзит) – 4 000 000;
- навантаження (Ерл) - 20 000;
- SS7 сигнальних з'єднань до 1 500 зв'язків.

Головні інтерфейси :

- до BSC;
- Iu до RNC;
- ISUP сигналізація до інших MSC;
- BICC протокол до інших серверів MSC;
- Ethernet 10/100Base до IP мережі;
- Ethernet 10/100Base, X.25, до білінгового центру;
- SS7 вузькосмугові сигнальні лінії (56/64 кбіт/с) по TDM;
- SS7 широкосмугові сигнальні лінії (1.5/2 Мбіт/с) по ATM;
- E1, E3, STM-1, STM-4.

Комутатор мережі CDMA, сервер додатків, центр керування та контролер базових станцій звичайно розміщуються в одному приміщенні. В цьому ж приміщенні розміщуються обладнання однієї базової станції, а також приймально-передавальна апаратура (радіорелейні станції й апаратура ІКМ) для підключення БС. Найбільш доцільним місцем розміщення цього обладнання є, як правило, центр міста.

11.4 Сервер додатків

Це навіть не один, а дев'ять серверів, реалізованих на платформах **Sun,** і які забезпечують можливість використання абонентами CDMA-мережі різних додатків. Кожний із серверів обслуговує, як правило, один додаток, хоча очікується, що деякі, особливо ресурсномісткі додатки можуть вимагати установки до трьох серверів на один додаток.

11.5 Центр керування

Керування елементами мережі, одержання даних про її роботу, проведення експериментів, діагностика – все це можна здійснювати з робочого місця оператора. По суті, це "перед-OMC" (Operations and Maintenance Center) – "бета-версія", спрощений центр керування і контролю за роботою мережі. В складі обладнання згадується аналізатор протоколів. Радіочастина мережі виконана на базі обладнання NEC.

11.6 Контролер базових станцій

Контролер базових станцій (RNC – Radio Network Controller) виробництва Siemens NEC **RN750**. Контролер підтримує можливість роботи в двох режимах і має ємність до 420.000 BHCA і пропускну здатність до 16.500 Ерланг або 600 Мбіт/с з підтримкою комутації каналів (CS) і передачі даних у пакетному режимі (PS). Такий контролер може працювати з 1024 базовими станціями. Всі основні елементи контролера передбачають можливість дублювання (резервування).

Інтерфейсна частина контролера забезпечує можливість підключення до 54 STM-1 або 1024 каналів тракту E1.

11.7 Базові станції стандарту IS-95

У системі зв’язку CDMA використовуються як звичайні, так і секторні чарунки, тобто кожна чарунка розбита на три сектори (антени з шириною діаграми направленості 120 градусів).

Як обладнання БС можна використати обладнання Motorola SC 9600, SC 2400 з "суперстільниковою" архітектурою для мереж зв’язку CDMA.

Фірмою Motorola розроблені комплекси мережного обладнання SC 9600 і SC 2400 для створення систем зв’язку з "суперстільниковою" (SC) архітектурою, що поєднує нові й існуючі технології стільникового зв’язку і відкриває широкі можливості щодо удосконалювання керування обладнанням і функціями зв’язку. Об’єднання і централізація керування компонентами різних мереж у сукупності зі створенням уніфікованого гнучкого приймально-передавального обладнання визначає перспективність нового технічного рішення Motorola SC 9600.

Обладнання SC 9600 призначене для роботи в смугах частот 869-894 МГц – передача від базової станції; 824-849 МГц – передавання від абонентської станції і складається з радіочастотного модему (SIF), що забезпечує формування сигналів з різними протоколами зв’язку, лінійного підсилювача потужності (LPA) і підсистеми діагностики.

До складу радіочастотного модему може входити до 80 CDMA канальних плат і 16 CDMA прийомопередавачів, що можуть забезпечити підтримку 320 CDMA каналів. Для TDMA, AMPS, N-AMPS SC 9600 може містити до 96 прийомопередавачів мовних повідомлень і сигнальної інформації.

До складу BTS може входити до трьох лінійних підсилювачів потужності. Кожен підсилювач обслуговує усі виходи передавачів, що працюють на одну антену і забезпечує дистанційне настроювання під конкретні частоти.

Підсистема діагностики забезпечує контроль і підтримку працездатності обладнання BTS разом з центром керування радіопідсистемою (OMC-R).

Між SC 9600 і центром комутації стільникового зв'язку підтримується відкритий інтерфейс, що забезпечує сумісність цього обладнання з центрами комутації різних виробників.

У цілому устаткування SC 9600 забезпечує можливість обслуговування абонентів у стандартах CDMA, AMPS, N-AMPS і D-AMPS. Крім того, можливе використання цього обладнання в мережах стільникової цифрової пакетної передачі даних (CDPD).

Робочі смуги радіочастот:

- 869-894 МГц – передача від базової станції;
- 824-849 МГц – передача від рухомої станції;
- 1930-1970 МГц – передача від базової станції;
- 2180-2200 МГц 1850-1890 МГц – передача від рухомої станції;
- 2130-2150 МГц.

Загальна ємність: 48 фізичних каналів для аналогових стандартів і 160 фізичних каналів для цифрових стандартів.

11.8 Абонентське устаткування

Безпроводовий радіотелефон QCT-6000

Стаціонарний безпроводовий радіотелефон QCT-6000, що працює в стандарті CDMA, заміняє кабельні телефонні системи в житлових будинках і офісах.

QCT-6000 – це можливість:
- підключення рівнобіжних телефонів;
- передачі даних;
- переадресації дзвінків;
- прийому дзвінків під час розмови;
- тристоронньої телеконференції;
- і багато чого іншого.

Безпроводовий радіотелефон QCT-1000

Телефонний апарат QCT-1000, що має можливість передачі даних. Вбудовані в телефон функції модема дозволяють підключитися до мережі Інтернет без придбання додаткового устаткування. Досить з'єднати Ваш комп'ютер з телефоном QCT-1000 і система прийом/передача даних готова. Стаціонарний безпроводовий телефон QCT-1000 легко підключається до

комп’ютера через вільний COM-port кабелем RS-232 і налаштовується як стандартний модем. Забезпечує швидкість передавання даних 14,4 кбіт/с.

Абонентський радіотелефон розміщується безпосередньо в приміщенні абонента з наявністю або без додаткової зовнішньої антени.

12 ОРГАНІЗАЦІЯ ЗВ’ЯЗКУ МІЖ БАЗОВИМИ СТАНЦІЯМИ ТА КОНТРОЛЕРОМ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ

У системі стільникового зв’язку базові станції розміщені рівномірно по всій території, що обслуговується. Оскільки системи зв’язку почали розвиватися, коли забудова місць вже сформувалася і прокладати нові магістральні кабельні лінії зв’язку дуже дорого, а потрібно передавати великі потоки інформації між базовими станціями та контролером базових станцій, під час створення стільникових систем зв’язку означені потоки були частково спрямовані по існуючих з’єднувальних лініях, а частково - по радіорелейних лініях зв’язку. Тому розглянемо деякі особливості радіорелейних систем передавання.

Радіорелейні системи – це системи зв’язку, які призначені для передавання значної кількості інформації на великі відстані по радіоканалах.

Радіохвилі в радіорелейних системах прямої видимості поширюються поблизу поверхні Землі, тому при розрахунку множника послаблення на інтервалах радіорелейних ліній необхідно враховувати спільний вплив тропосфери і земної поверхні. Вплив тропосфери полягає в рефракції радіохвиль і їхньому відбитті від шаруватих утворень і поглинань під час дощу. Близькість земної поверхні служить причиною відбиття й інтерференції радіохвиль, а також їхньої дифракції. При цьому характер впливу земної поверхні залежить від її електричних параметрів, від розміщення передавальної і приймальної антен, а також від рельєфу місцевості.

Дощ викликає послаблення, що має більший вплив, ніж гази, що утворюють повітря. Значення послаблення внаслідок дощу залежить від частоти радіосигналу і виду поляризації, інтенсивності дощу й меншою мірою від температури (рис. 12.1, 12.2.).

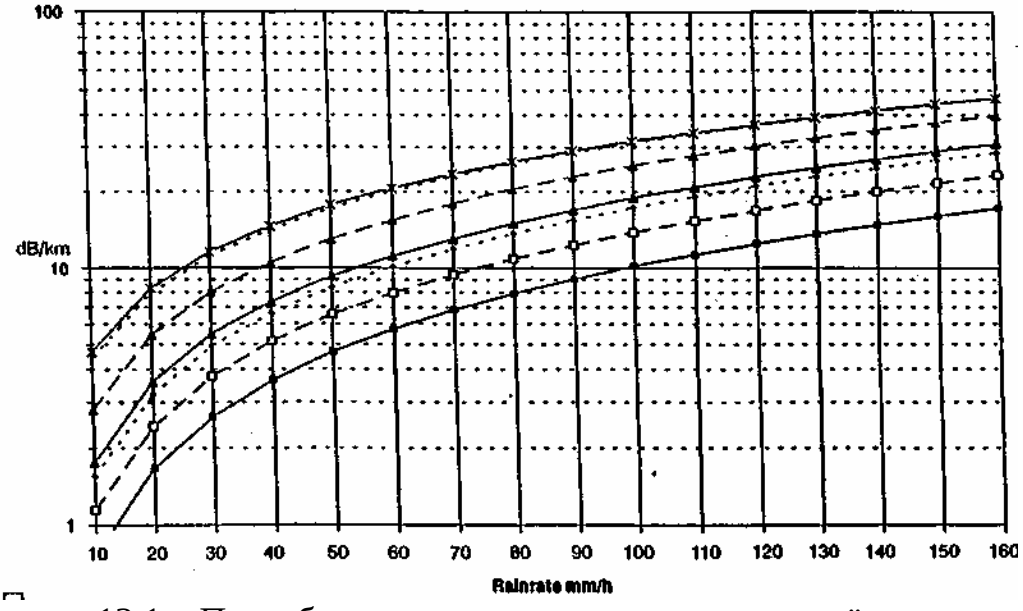

Рисунок 12.1 – Послаблення сигналу для горизонтальної поляризації

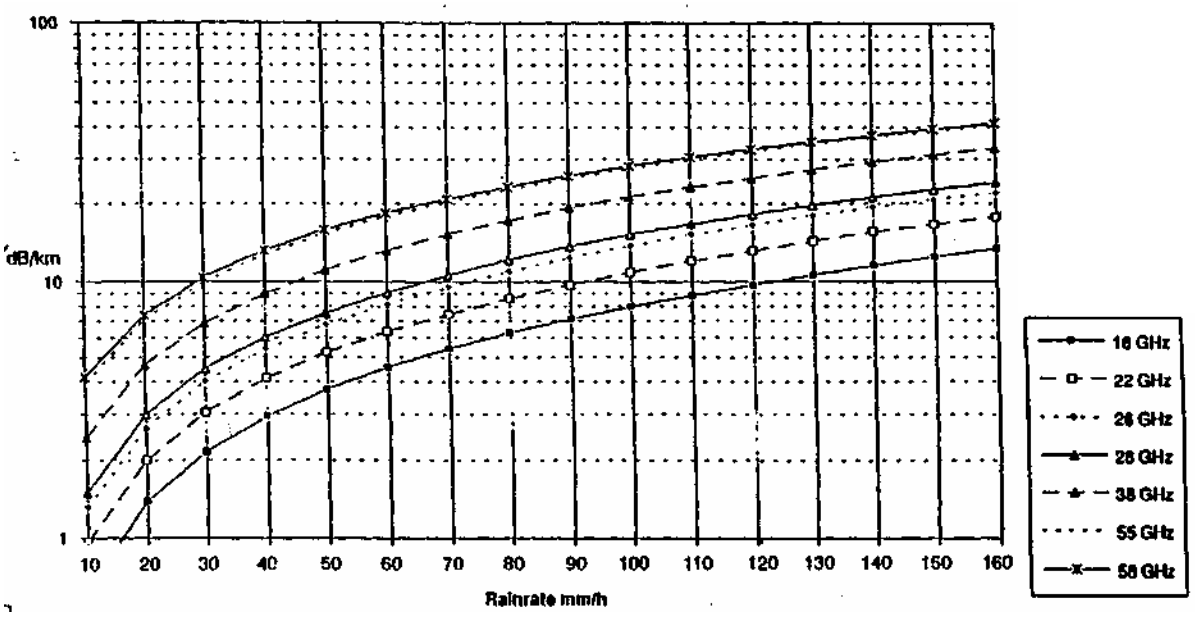

Рисунок 12.2 – Послаблення сигналу для вертикальної поляризації

Відбиття радіохвиль на межі “атмосфера – земна поверхня” виникає через різницю діелектричної проникності і питомої провідності двох середовищ. При влученні в приймальну антену прямих і відбитих хвиль відбувається їхня інтерференція. При цьому просторово-часові характеристики сумарної хвилі залежать від різниці ходу хвиль, що в умовах тропосферної рефракції має випадковий характер. Дифракція радіохвиль проявляється у вигляді обгинання ними височин земної поверхні й, незначною мірою, сферичної поверхні Землі.

У діапазоні частот понад 11 ГГц, що використовуються в ЦРРСП, не можна зневажати втратами в атмосфері (рис. 12.3) за рахунок поглинання в парах води й у кисні.

Щоб забезпечити радіорелейний зв’язок у межах прямої видимості, необхідно підняти антени над рівнем землі на вежах або щоглах. Висоти антенних веж залежно від довжини і профілю кожного інтервалу між сусідніми станціями можуть досягати 20...60 м. Коли станція розташована на природній височині, антени можуть бути встановлені на даху будинку, в якому знаходиться приймально-передавальне обладнання.

При побудові радіорелейних систем значна частина витрат пов’язана зі спорудженням антенних веж і фідерних трактів. Ці витрати швидко зростають зі збільшенням висоти веж, тому з погляду економічності на радіорелейних лініях бажано використовувати якомога нижчі вежі. Висоти веж залежать від необхідних висот підвісу антен, які, у свою чергу, вибираються за умови забезпечення заданих показників якості каналів передачі: нестійкості, рівня шумів та допустимих ймовірностей помилок.

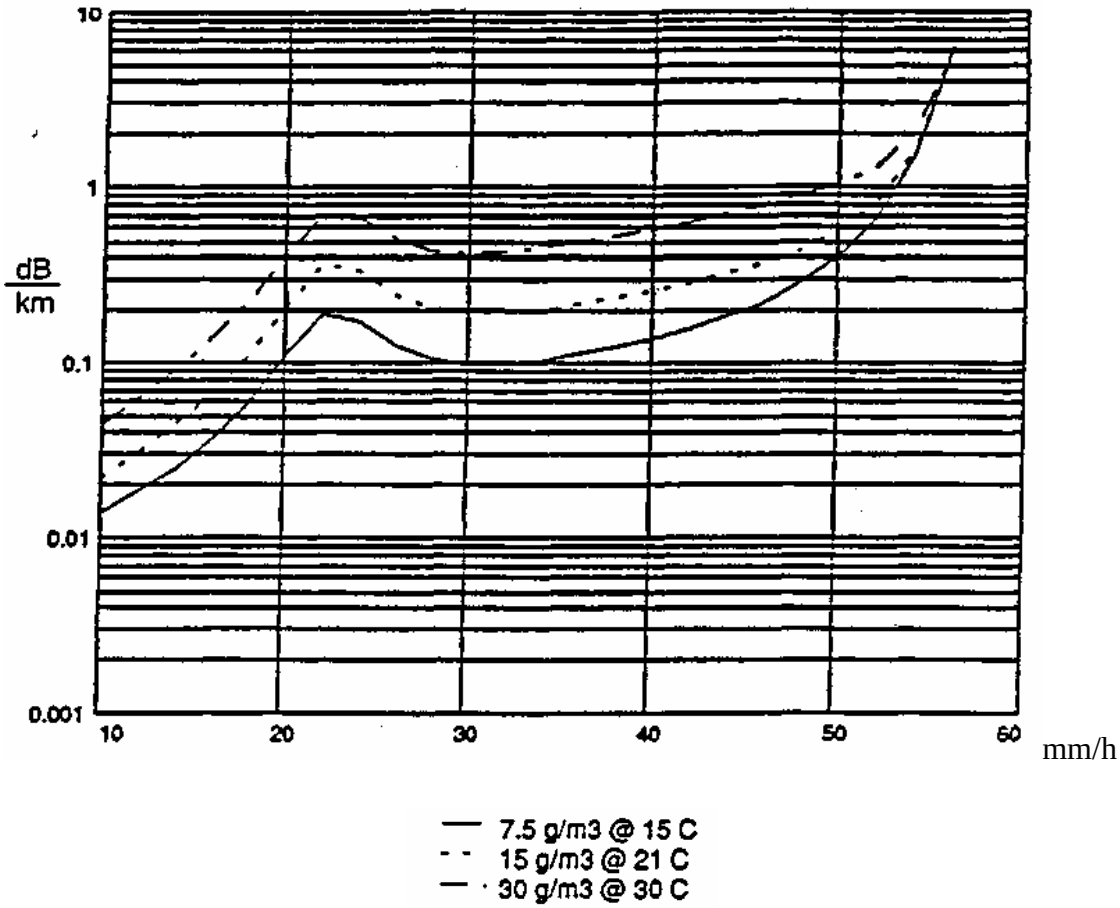

Рисунок 12.3 – Послаблення сигналу за рахунок поглинання у водяній парі й у кисні

Приклад організації передавання інформації між елементами мережі показано на рис. 12.4, а діаграма рівнів на інтервалі РРЛ – на рис. 12.5

BSC – контролер базової станції;
BTS – базова станція;
DMF – кабельне обладнання;
DMR 18W– цифровий радіорелейний пристрій типу DMR 18W;
DN2 – динамічний вузловий пристрій;
MSC – комутатор стільникового зв'язку.

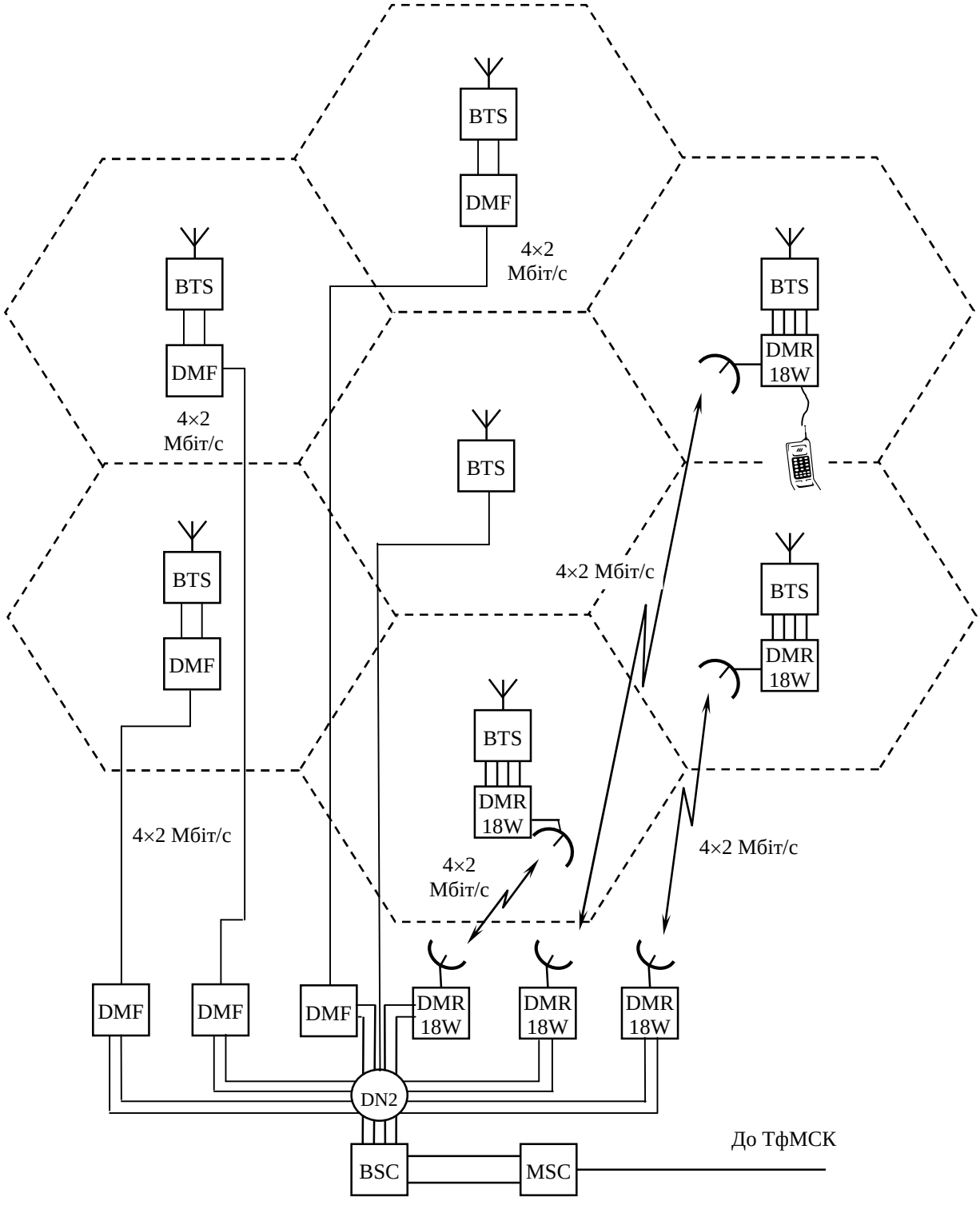

Рисунок 12.4 – Схема принципу використання радіорелейного обладнання типу DMR 18W у стільниковій мережі

Діаграма рівнів на інтервалі радіорелейної лінії передачі

Вихідні дані для побудови діаграми рівнів:

- P_{tx} = 16 дБм;
- G_A = 39.4 дБ;
- L_0 =136,12 дБ;
- L_0 + $A_{0.01}$ = 136,12 + 19,08 = 155,2 дБ;
- P_{rtx} = –82дБм.

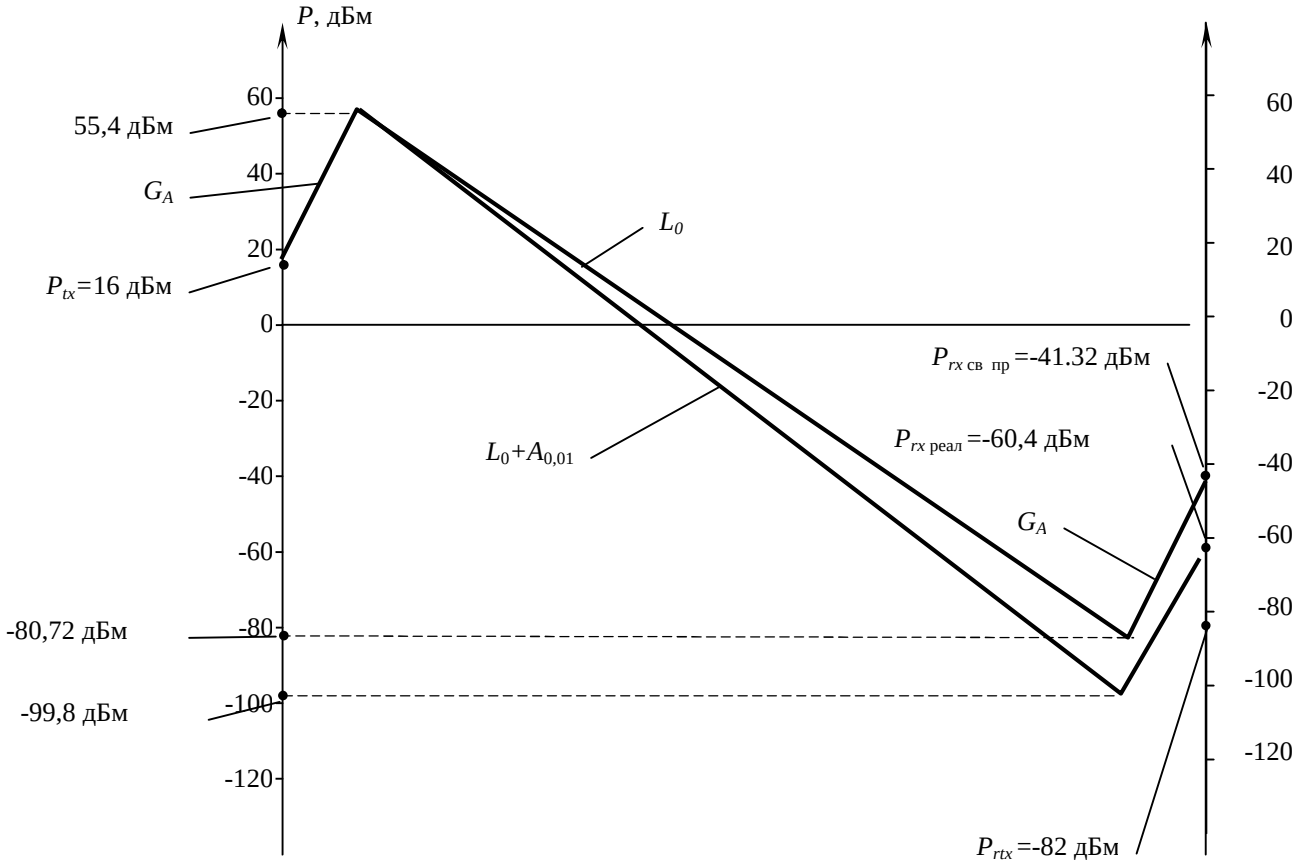

Рисунок 12.5 – Діаграма рівнів інтервалу радіорелейної лінії передачі

Як видно з діаграми рівнів радіосигналу на інтервалі РРЛ виконується умова стійкого зв'язку ($P_{rtx} < P_{rx\ реал}$). Тобто стійкий зв'язок буде забезпечений з урахуванням усіх факторів, що впливають на поширення радіохвиль.

Література

1 *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

2 *Громаков Ю.А.* Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Эко-Трендз, 1997. – 238 С.

3 *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.

4 СДМА: прошлое, настоящее, будущее / Под ред. С.А. Анфилофьев, Л.Е. Варакин, В.В. Калмыков, Ю.С. Шипаков, М.С. Ярлыков.– М.: МАС, 2002. – 345 с.

5 *Маковеева М.М., Шипаков Ю.С.* Системы связи с подвижными объектами: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.

6 Сравнение различных систем сотовой подвижной связи по эффективности использования радиочастотного спектра / М.А. Быховский и др. // Электросвязь. – 1996. – № 5. – С. 9 – 12.

7 Методика расчета абонентской емкости в сетях сухопутной стационарной радиотелефонной связи на основе технологии СДМА / М.А. Быховский и др. // Мобильные системы. – 1998. – № 3. – С. 27 – 29.

8 *Карташевский В.Г., Семенов С.Н., Фирстова Т.В.* Сети подвижной связи. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 302 с.

9 *Мухин А.М., Чайников Л.С.* Энциклопедия мобильной связи. В 2-х т. – Т. 1. Системы связи подвижной службы общего пользования. – С.Пб.: Наука и техника, 2001. – 240 с.

10 *Мухин А.М., Чайников Л.С.* Системы связи подвижной службы: Учебное пособие. – К.: Світ знань, 2001. – 216 с.

11 *Сукачев Э.А.* Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами: Учебное пособие. –2-е изд., испр. и дополн. – Одесса: УГАС, 2000. – 119 с.

Редактор – *Л.А. Кодрул*
Комп’ютерне макетування – *Ж.А. Гардиман*