

**Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”**

**Факультет електроніки  
Кафедра звукотехніки та реєстрації інформації**

## **ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ БЕЗПРОВОДОВІ СИСТЕМИ**

**Частина 3**

**«Системи цифрового телебачення»**

### **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

для студентів напряму підготовки

6.050903 «Телекомунікації»

спеціальності

8.05080302 «Телекомунікаційні системи та мережі»

*Рекомендовано Вченою радою факультету електроніки*

Київ 2016

«Системи цифрового телебачення»: Конспект лекцій з дисципліни «Телекомунікаційні безпроводові системи», част.3 / Уклад.: - Київ., 2016.- 106 с.

*Гриф надано Вченою радою ФЕМ  
(Протокол № 05/2016 від 30 травня 2016р.)*

**Навчальне видання**

# **ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ БЕЗПРОВОДОВІ СИСТЕМИ**

**Частина 3**

**«Системи цифрового телебачення»**

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни «Телекомунікаційні безпроводові системи»

*Укладачі: Лазебний Володимир Семенович, канд.техн.наук, доц.  
Попович Павло Васильович, асистент*

*Відповідальний редактор Ю.Г.Савченко, д-р техн. наук, проф.*

*Рецензент С.Р.Михайлов, канд.техн.наук, доц..*

*За редакцією укладачів*

## Зміст

Лекція 1. Загальна характеристика систем цифрового телебачення .....	4
Лекція 2. Система наземного телевізійного мовлення DVB-T.....	17
Лекція 3. Формування радіосигналу у системі наземного телевізійного мовлення DVB-T.....	27
Лекція 4. Організація та принципи функціонування системи цифрового телебачення DVB-T2 .....	48
Лекція 5. Система цифрового телевізійного мовлення. стандарт DVB-S.....	60
Лекція 6. Стандарт DVB-S2. система супутниковогоцифрового телевізійного мовлення .....	66
Лекція 7. Система цифрового телевізійного мовлення. Стандарт DVB-C.....	79
Лекція 8. Система цифрового кабельного телебачення DVB-C2.....	88
Лекція 9. Система мобільного телемовлення. Стандарт DVB-H .....	98

## Лекція 1

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ

*Навчальні питання:*

- 1. Огляд систем цифрового телебачення*
- 2. Організація спільного аналогового й цифрового телевізійного мовлення*
- 3. Особливості реалізації інформаційних послуг систем цифрового телебачення*
- 4. Особливості впровадження систем цифрового телебачення*

#### **1. Огляд систем цифрового телебачення**

Сьогодні у світі впроваджено чотири системи цифрового телебачення: DVB (Digital Video Broadcasting, 1993-1995), ATSC (Advanced Television Systems Committee, 1993), ISDB (Integrated Service Digital Broadcasting, 1995), DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting, 2006).

Усі зазначені системи мають кілька модифікацій для поширення сигналу засобами супутникових систем зв'язку – Sattelite (S), засобами кабельних розподільних мереж Cable (C), засобами ефірного наземного мовлення – Terrestrial (T).

Окремий сегмент складають системи для передавання телевізійних сигналів на рухомі об'єкти. Такі системи називають цифровими системами мобільного телебачення.

Перехід до цифрових систем телебачення обумовлений кількома причинами.

По-перше, цифровий формат дозволяє збільшити обсяг інформації, яку можна передати у стандартному каналі аналогового телебачення (Європа – 8 МГц, США, Японія – 6 МГц). Як наслідок, у цих каналах можливо передавати програми у форматі телебачення високої чіткості (ТВЧ).

По-друге, перехід на цифрове телевізійне мовлення створює підґрунтя для введення додаткових послуг, у тому числі інтерактивних.

По-третє, цифровий сигнал є більш стійким до впливу електромагнітних завад різного походження і його застосування забезпечує однаково високу якість відтворених зображення та звуку в усій зоні покриття передавачів.

По-четверте, для надійного передавання сигналів цифрового телебачення у межах певної зони обслуговування необхідно використовувати значно меншу потужність передавачів у порівнянні з системами аналогового телебачення.

По-п'яте, сигнали цифрового телебачення мають шумоподібну структуру і їхній частотний спектр має доволі рівномірний розподіл енергії в межах виділеної радіочастотної смуги, що обумовлює низький рівень завад для інших телекомунікаційних систем.

Цифрове телевізійне мовлення з використанням систем, у яких застосовано систему модуляції та кодування COFDM, додатково дає можливість надійного приймання телевізійних сигналів на портативні й мобільні антени, а також дозволяє створювати одночастотні мережі на значних територіях.

COFDM – система модуляції та кодування, що відрізняється від OFDM уведенням у процес передавання інформаційного цифрового потоку ще однієї додаткової процедури завадостійкого канального кодування.

Першими почали регулярне ефірне цифрове мовлення Великобританія й США. Пізніше до них приєдналися Швеція й Іспанія.

Як ми вже зазначили на сьогоднішній день існує чотири стандарти на цифрове ефірне телебачення. Це американський стандарт – ATSC (Advanced Television Systems Committee), європейський DVB–T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial), японський ISDB–T (Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial) та китайський DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting, 2006).

Суттєвою складовою глобального підходу стала запропонована стратегія впровадження цифрових систем ТВ зі збереженням існуючих наземних та супутникових каналів.

Відповідно до цього підходу було розроблено проект першої Рекомендації МСЕ, в якій для можливості впровадження наземного цифрового телевізійного (ТВ) мовлення (НЦТВ) на даному етапі передбачено можливість збереження і здійснено нормування спектрів випромінювання у стандартних смугах частот, закріплених за каналами аналогового ТВ мовлення. Це дозволило сфокусувати дослідження зі стиснення цифрових ТВ сигналів, пошуку ефективних методів модуляції і оброблення сигналів на чітко поставленому завданні. Вирішення цього завдання в підсумку дозволило створити систему багатфункціонального інформаційного обслуговування і передавати сигнали цифрового телебачення, багатопрограмного телебачення, телебачення високої чіткості, програм стереоскопічного телебачення, великих обсягів цифрових даних, мультимедійної та іншої інформації (рис. 1.1) через наявні радіочастотні канали зі смугами частот 6, 7 і 8 МГц (концепція 6-7-8).

Така стратегія гарантувала еволюційний перехід від аналогових до цифрових ТВ системам з обмеженими витратами.

Таким чином, на розгляд дослідної комісії ДК 11(ITU-D (МСЕ-Д) – Сектор розвитку електрозв'язку) було подано на розгляд три несумісні системи НЦТВ, розроблені в Європі, США та Японії. У зв'язку з цим було вирішено знайти шляхи доопрацювання даних систем і гармонізувати їх параметри, щоб уникнути невиправданого застосування багатьох стандартів. Однак у процесі цієї роботи було потрібно брати до уваги відмінності між концепціями систем кольорового аналогового та цифрового ТВ мовлення. У разі використання цифрових методів кожен з конкурентів прагнув надати своїй системі нові можливості. Тому цифрові варіанти трьох систем розглядали не як різні способи досягнення однієї і тієї ж мети, а скоріше як засоби забезпечення гнучкості, що дозволяє адаптувати систему до різних обставин, щоб набути більшої привабливості для операторів і масового користувача.

У першу чергу потрібно було проаналізувати можливості сполучення систем з урахуванням їх загальних і відмінних функцій і характеристик.

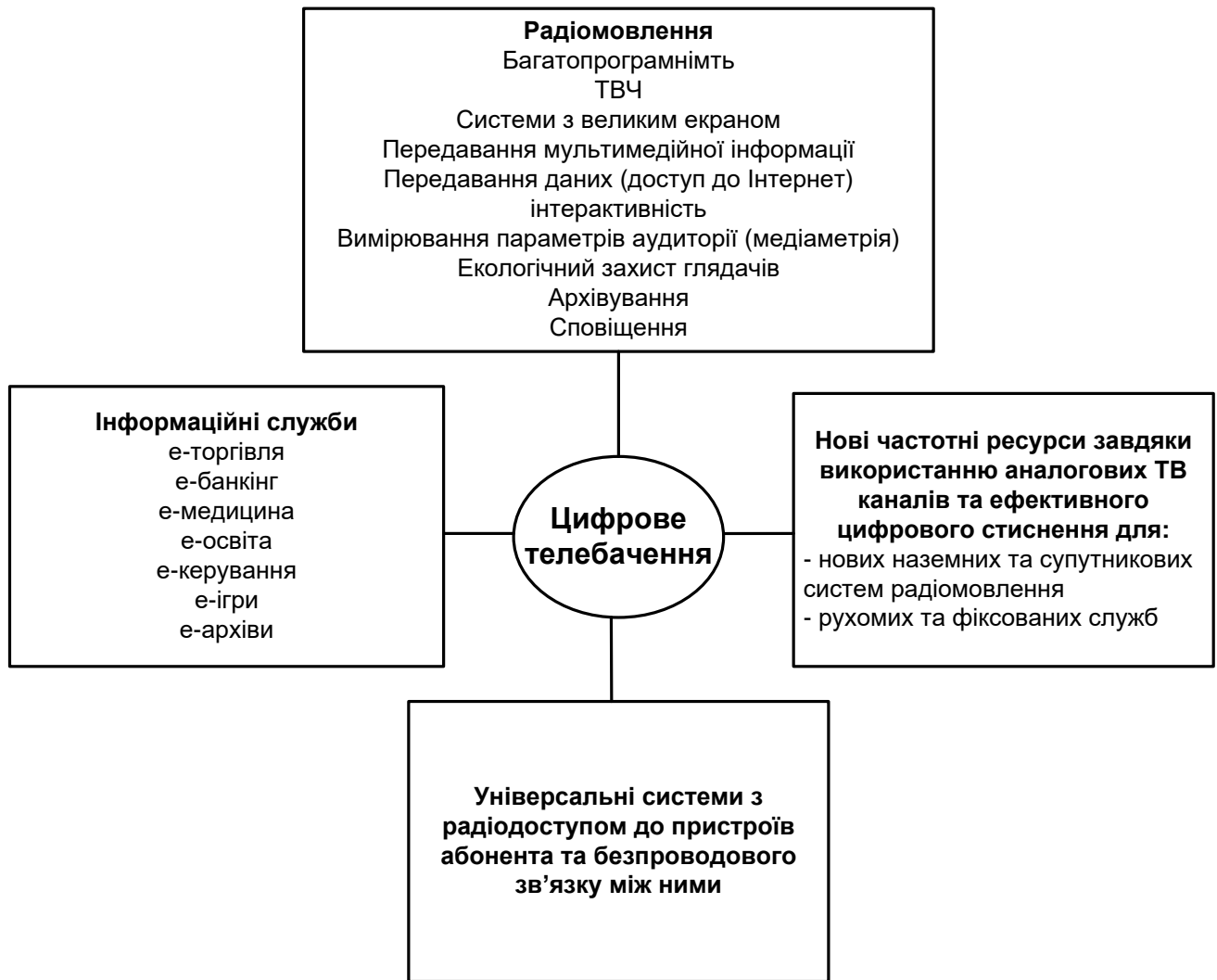


Рисунок 1.1 – Сфери застосування та призначення цифрового телебачення

Системи ATSC, DVB-T і ISDB-T в основному розрізнялися на рівні під-системи адаптації до каналу радіомовлення, головним чином застосованими методами модуляції, а також алгоритмами кодування звукового сигналу. Смуги і діапазони частот радіоканалу в базових варіантах систем збігалися з прийнятими для аналогового мовлення в країнах-розробників.

В усіх системах було передбачено використовувати методи мультиплексування і формування транспортних пакетів, що відповідають вимогам стандарту MPEG-2.

В усіх системах також було застосовано такі способи боротьби з помилками, як скремблювання, перемежування, зовнішнє кодування Ріда-Соломона, внутрішнє кодування згортковим кодом.

Розглянемо коротко основні особливості згаданих систем НЦТВ.

Систему 8-VSB ATSC було розроблено спеціально таким чином, щоб до кожного з активного передавача аналогової системи NTSC у США можна було

підключити обмежений додатковий комплекс апаратури, що забезпечує перехід на цифровий режим роботи з порівнянними за розмірами зонами обслуговування телевізійним сигналом з фіксованим прийманням мовленням. Основний формат зображення – формат високої чіткості.

Європейську систему DVB-T було розроблено з властивостями, що забезпечують істотну гнучкість, яку досягнуто за рахунок можливості широкого набору параметрів, для забезпечення фіксованого та мобільного приймання, а також побудову одночастотних мереж.

Систему ISDB-T, розроблено в Японії. Японські спеціалісти брали участь у розробленні системи DVB-T, тому ISDB-T близька за технічними рішеннями до системи DVB-T, але за необхідності може забезпечити розширені можливості мультимедійних служб та з використання радіоспектру кількома сегментованими частотними смугами, для кожної з яких можна встановлювати свій тип модуляції і коригувального кодування.

У результаті зроблених досліджень і обговорень вдалося подолати наявні суперечності і знайти шляхи сполучення систем, а також підготувати керівництво щодо їх вибору для країн, які планували запроваджувати системи цифрового телебачення.

Було мінімізовано відмінності систем щодо функціональних особливостей і здійснено їх гармонізацію стосовно кодування відеосигналів, транспортного рівня тощо. Роботи із залученням багатьох фірм-виробників дозволили на підґрунті гармонізованого набору функціональних засобів вирішити важливе питання щодо можливості створення єдиного інтегрованого декодера.

У результаті було створено передумови для занесення доопрацьованих і узгоджених систем та керівництва до їх вибору в одну Рекомендацію ВТ.1306 і перетворення регіональних систем в міжнародні цифрові системи наземного мовлення А (ATSC), В (DVB-T) і С (ISDB -Т) з можливістю використання для приймання сигналів усіх систем єдиного інтегрального декодера.

Новий модифікований проект Рекомендації ВТ.1306 був прийнятий одногосно більш ніж 50 представниками країн і міжнародних організацій.

У 2011 році ДК 6 схвалила проект оновленої Рекомендації ВТ.1306, доповненої специфікацією, розробленою в КНР НЦТВ системи D (DTMB, Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcast) на підставі внеску КНР.

В системі DTMB використовуються 3780 носійних і модуляція OFDM. Вона відрізняється тим, що оброблення сигналів здійснюють як в часовій (подібно ATSC), так і в частотній області (подібно DVB-T). Система забезпечує надійне приймання телепрограм навіть за умови швидкості руху транспортного засобу (поїзд, автомобіль тощо) понад 200 км/год. Припустимий доплерівський зсув частоти становить 110 Гц. Швидкість передавання сигнальних потоків може становити 4,81 – 32,486 Мбіт/с в одночастотній або багаточастотній мережі. Поліпшений варіант системи DTMB-A з режимами 4k (4096 носійних), 8k (8192 носійних) і 32k (32678 носійних) надає послуги мовлення ТВЧ і телебачення стандартної якості, а також передавання даних з можливістю приймання сигналів усередині і поза приміщеннями на стаціонарні та мобільні приймачі. У цьому варіанті застосовані спосіб каналного кодування з низькою щільністю пе-

ревірки на парність або код Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема, що забезпечують великі зони покриття в одночастотних та багато частотних мережах.

У 2011 році Рекомендацію ВТ.1306 було доповнено новою специфікацією системи DVB-T (система В). Це специфікація більш ефективної системи НЦТВ нового покоління DVB-T2.

DVB-T2 є другим поколінням стандарту DVB-T і дозволяє збільшити пропускну здатність мереж НЦТВ на 30 - 50% у порівнянні з DVB-T за тієї ж інфраструктури мережі й частотних ресурсах. Система DVB-T2, технологічно несумісна з DVB-T. В ній застосовано стандарт стиснення зображення MPEG-4 AVC, модуляція OFDM і велике число носійних. У DVB-T2 передбачено можливість організації ТВ мовлення із застосуванням каналів зі смугами пропускання 1.7 (мобільне телебачення), 5, 6, 7, 8 і 10 МГц зі швидкістю до 50 Мбіт/с.

У системі DVB-T2 передбачено також можливість передавання кількох незалежних транспортних потоків одночасно. Для цього частотну смугу радіоканалу розділяють на окремі більш вузькі частотні смуги (підканали) для кожного потоку. Для корекції помилок в каналі використовують таке ж кодування, яке було обрано для DVB-S2, в тому числі, кодування з малою щільністю перевірки на парність (LDPC) і код Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема (BCH). Приймання сигналів може бути здійснено на колективну, індивідуальну або кімнатну антену, підключену до телевізора з вбудованим декодером DVB-T2 або до приймача-приставки STB.

Стандарт DVB-T2 використовують для передавання мультиплексів (потік цифрових даних, що несуть один або кілька ТВ каналів в межах одного радіоканалу).

В даний час з метою розширення послуг, що надаються НЦТВ, розвиваються системи ТВ телерадіомовлення на мобільні телефони, планшети та інші переносні приймачі та приймачі на транспортних засобах. До цієї області відносяться системи DVB-H і DVB-T2-Lite.

Стандарт DVB-H є логічним продовженням стандарту DVB-T з підтримкою додаткових можливостей згідно вимог для переносних мобільних приймачів з автономним електроживленням.

DVB-H має такі особливості, що відрізняють його від базового стандарту DVB-T і дозволяють отримати необхідну якість зображення обумовлену можливостями мобільного приймального терміналу:

- зменшена роздільна здатність (320x241 пікселів) на невеликому екрані мобільного терміналу;
- застосовано технологію часових інтервалів (часового ущільнення), що забезпечує істотну економію спожитої електроенергії.

У разі часового ущільнення корисну інформацію передають на термінал не постійно, а короткими пакетами з великою швидкістю, наприклад, 10 Мбіт/с, і тривалістю, значно меншою часу очікування. Після закінчення передавання кожного пакета приймач тимчасово вимикається і переходить в режим зчитування даних з буфера зі швидкістю 250 кбіт/с, цілком достатньою для якісного відтворення ТВ зображення DVB-H. Таким чином, час відключення приймача



перевищує тривалість його роботи в 40 разів, що еквівалентно економії електроенергії близько 90%.

Стандарт DVB-T2-Lite є розширенням стандарту DVB-T2, розробленим як новий профіль (специфікація) для мобільного телебачення. Приймальні пристрої T2-Lite підтримують тільки частину можливостей базового стандарту DVB-T2, що дозволяє зменшити розміри приймальних пристроїв і знизити їх енергоспоживання. Передавання сигналів T2-Lite можна здійснювати в одному з двох режимів.

Перший режим вимагає виділення окремого мультиплексу для програм T2-Lite, але такий сигнал зможуть приймати також і звичайні приймачі стандарту DVB-T2.

У другому режимі мовлення можна здійснювати всередині мультиплексу DVB-T2. У такому разі DVB-T2 приймачі «побачать» тільки свою частину сигналу, а T2-Lite пристрої – свою. Для забезпечення приймання сигналів за складних умов передбачено передавання одного і того ж потоку у двох різних версіях, що відрізняються швидкостями передавання і рівнями захисту.

Було переглянуто Рекомендацію MCE-P BT.1206, у новому варіанті якої наведено обвідні спектру радіосигналів для НЦТВ систем А (ATSC), В (DVB-T), С (ISDB-T) і D (DTMB).

Розроблено Рекомендацію MCE-P BT.2016, в якій розглянуто такі системи цифрового наземного мультимедійного мовлення:

- мультимедійна система А (T-DMB і AT-DMB);
- мультимедійна система F (ISDB-T мультимедійне мовлення для мобільного приймання);
- мультимедійна система I (DVB-SH);
- мультимедійна система H (DVB-H);
- мультимедійна система T2 (профіль T2 Lite системи DVB-T2).

У Рекомендації наведено параметри передавання систем мовлення (смуга радіоканалу, кількість носійних, інтервал між носійними, тривалість символу, тривалість кадру, тип синхронізації, види модуляції, параметри каналного кодування і перемежування, швидкості передавання даних тощо), а також технічні аспекти (можливості роботи за умови багатопроменевого поширення і завмиранні сигналу, в одночастотних мережах, можливість застосування ієрархічної модуляції, спектральна ефективність тощо).

У стадії розроблення проект нової Рекомендації MCE-P стосовно критеріїв планування наземного мультимедійного мовлення для мобільного приймання на переносні приймачі у смугах ДВЧ/УВЧ. Рекомендація буде визначати критерії планування радіомовлення (захисні відношення, мінімальні необхідні напруженості поля тощо, для стаціонарного, переносного і мобільного приймання). На тепер у проект Рекомендації внесено системи, перераховані в Рекомендації MCE-P BT.2016.

Було розроблено Рекомендацію MCE-P BT.1833, що є керівництвом з розроблення засобів для приймання на рухомі пристрої сигналів мультимедійних послуг і послуг передавання даних.

У Рекомендації описано такі системи цифрового наземного мультимедійного мовлення:

- система А (Т-DMB, АТ-DMB);
- система В (ATSC Mobile DTV - вдосконалений варіант системи ATSC);
- система С (односегментної система ISDB-T);
- система Е (Рекомендація MCE-P ВО.1130 для супутникового сегменту і Рекомендація MCE-P BS.1547 для наземного сегмента);
- система F (ISDB-T);
- система H (DVB-H);
- система I (DVB-SH);
- система M (FLO);
- система T2 (DVB T2-Lite).

Наведено відомості про послуги радіомовного багатоадресного передавання мультимедійної інформації, що має бути забезпечено мережами електрозв'язку з багатоадресними послугами (MBMS).

Рекомендація MCE-P BT.1833 досить велика за обсягом та змістом, тому вирішено розділити її на дві Рекомендації, в одній з яких буде розглянуто мультиплексування і схеми транспортування інформації в системах мультимедійного мовлення для мобільного приймання, а в другій – питання контенту цих систем.

Прийняті Рекомендації MCE-P BT.1869 щодо мультиплексування пакетів змінної довжини в системах цифрового мультимедійного мовлення і BT.1887 стосовно передавання IP пакетів у транспортних потоках MPEG-2 у системах мультимедійного мовлення.

На тепер у стадії розроблення є проект нового Звіту MCE-P про оцінювання завад створюваних службі радіомовлення когнітивними пристроями у смузі 470 - 790 МГц. Здійснюють дослідження щодо захисту радіомовних систем від завад, утворених системами передавання цифрової інформації лініями електроживлення.

На відміну від ATSC, європейський стандарт під час впровадження цифрового телевізійного мовлення не призводив до серйозних технічних проблем. Одна з проблем, що мала місце, пов'язана в наявності різкого зменшення рівня C/N у разі зменшення потужності випромінюваного сигналу. Це явище створює деякі складності з визначенням наявного запасу рівня сигналу під час налаштування приймальної системи. Стандартним способом розв'язання проблеми є встановлювання після антени аттенюатора 6 дБ на час налагоджування. Інша проблема, що далася в знаки у Великобританії, пов'язана із сусідством потужних аналогових каналів.

У національних частотних планах, розроблених на період переходу від аналогового мовлення до цифрового, цифрові канали найчастіше доводиться розміщувати між аналоговими. Саме в такий спосіб організовано частотну сітку Великобританії. Цифрове мовлення в порівнянні з аналоговим потребує набагато менших передавальних потужностей. Для покриття тієї ж зони потрібен цифровий передавач на 20 дБ (в 100 разів) менш потужний порівняно з аналого-

вим. Крім того, під час запуску цифрового мовлення у Великобританії, основну увагу приділяли тому, щоб цифрові канали не створювали інтерференції в спектрі аналогових каналів.

У результаті, цифрові передавачі здійснюють радіомовлення з потужністю на 20–70 дБ нижче, ніж аналогові. Величезне перевищення рівня аналогових сигналів над цифровими призводить до виведення антенних підсилювачів з лінійного режиму й появи потужних гармонік аналогових сигналів у спектрі цифрових. Для вирішення цієї проблеми у Великобританії створено спеціальну програму енергетичного узгодження цифрових і аналогових передавачів.

## **2. Організація спільного аналогового й цифрового телевізійного мовлення**

Певною проблемою для більшості країн є пошук частотного ресурсу.

На першому етапі в багатьох країнах ця проблема була пов'язана з заповненням частотного ресурсу аналоговими радіоканалами. У майбутньому ж цифровому ефірному телебаченню, імовірно, доведеться конкурувати за місце в ефірі з іншими радіочастотними службами, у першу чергу з системами мобільного зв'язку UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) та LTE.

На Всесвітній конференції з питань радіозв'язку вже було розглянуто питання про виділення смуг для розширення послуг мобільної телефонії в ефірному спектрі (47–862 МГц). Розширення потрібне, у першу чергу, для реалізації проекту ІМТ–2000. Зрештою, було вирішено надати мобільній телефонії можливість розширюватись в діапазоні 2.5–2.68 ГГц, тобто в MMDS діапазоні. Проте ясно, що у процесі подальшого розвитку мобільного зв'язку найбільш ймовірним є скорочення частотного ресурсу саме для служби ефірного ТБ.

У цьому сенсі показовою є ситуація в США, які випереджають Європу у розвитку телекомунікаційних служб. Там, після затвердження частотної сітки цифрового ефірного ТБ, для служб мобільної телефонії було звільнено більшу частину смуги 700–800 МГц.

Проект ІМТ–2000 передбачає формування глобальної мобільної мережі, що забезпечує мультимедійний широкосмуговий зв'язок. Швидкість передавання інформації з каналів майбутньої глобальної мережі приблизно складе 2–16 Мбіт/с, тобто буде достатньою для передавання сигналів будь-яких відеопослуг.

За прогнозами ентузіастів мобільного зв'язку нова мережа повинна витіснити багато інших телекомунікаційних систем, у тому числі й ефірні мережі ЦТ.

Однак ці прогнози поки не є дуже реалістичними.

Проте службам ефірного телебачення буде необхідно постійно доводити Міжнародному Союзу Електрозв'язку, що вони гідні виділеного їм місця під сонцем.

Одним з важливих чинників, що враховують під час визначення права служб на дефіцитний діапазон, є ефективність використання спектра. Критерії оцінки такої ефективності неоднозначні. Якщо оцінювати кількість біт, які мо-

жна передати в смузі 1 Гц на площі 1 кв. км, то спектр у ТВ мережах використовується зараз дуже неефективно. За розрахунками, зробленим керівником планування цифрового мовлення ірландського каналу RTE Пітером Брангамом, мережі GSM за цим критерієм уже сьогодні перевершують ефірні мережі ЦТ в 470 разів.

Однак таке порівняння не можна вважати коректним. Мережі мобільної телефонії забезпечують з'єднання між двома абонентами, у той час як трансльований через ТВ канал футбольний матч дивляться одночасно мільйони людей. Очевидно, що у разі трансляції програм з мільйонною аудиторією спектр використовується дуже ефективно.

З іншого боку, останнім часом стали з'являтися численні канали, розраховані на вузьке коло глядачів. Це переважно регіональні спеціалізовані канали, наприклад географічні. Для них типово багаторазове повторення тих самих найцікавіших передач, тобто робота в режимі, наближеному до NVOD (Near Video On Demand).

На думку П. Брангама, у зв'язку зі здешевленням жорстких дисків каналам такого роду незабаром стане вигідніше зберігати програми на жорсткому диску й передавати їх у зручний для абонентів час.

Із сукупності цих міркувань він робить висновок, що максимально ефективно спектр використовувався б у разі сполучення традиційного всеспрямованого телевізійного мовлення на більші площі зі стільниковим секторним передаванням, що створює умови для багаторазового використання спектра.

### **3. Особливості реалізації інформаційних послуг систем цифрового телебачення**

За традиційною схемою телебачення має передавати сигнали національних та й міжнародних програм, орієнтованих на широку аудиторію, а стільникова мережа – має забезпечити місцеві профільні програми й інтерактивні послуги (Інтернет, електронна комерція, передавання відеофайлів тощо). Стільникове телебачення є особливо актуальним в урбанізованих районах.

Під час оцінювання працездатності стільникових мереж із секторним передаванням основним параметром є відношення рівня корисного сигналу каналу до рівня завад від сусідніх каналів. У разі переходу на цифрове мовлення з використанням COFDM модуляції вимоги до цього параметра значно зменшуються. Якщо для якісного аналогового мовлення це відношення має становити 40 дБ, то для деяких режимів цифрового досить 10 дБ. Правильна реалізація цих можливостей дозволить створювати мережі, що сполучать ефективно використання спектра з дешевими каналами надання послуг.

Процес побудови повноцінних інтерактивних ефірних мереж частково гальмується й самими ефірними операторами. Проблеми виникають через те, що впровадження інтерактивних послуг і нових технологій призводить до зміни функцій операторів у процесі доставки ТВ матеріалу телеглядачам.

У традиційному ланцюжку матеріал, створений контент-провайдерами, компілюється телевізійними дистриб'ютерами й передається мережними опе-

раторами. Мережа прозора для передавання будь-якого матеріалу. Із впровадженням «відео на замовлення», інтелектуальних магнітофонів і інших форм «TV Anytime» значимість дистриб'ютерів, як компіляторів матеріалу, значно зменшується.

З іншого боку, в інтерактивних мережах вибір можливих послуг залежить від використовуваної в мережі платформи інтерактивного ТБ. Тому виробники матеріалу більшою мірою погоджують свою діяльність з операторами платформ інтерактивного ТБ і операторами мереж, що підтримують ці послуги.

У результаті "чисті" телевізійні компанії поступово витісняються з ланцюжка мовлення. У боротьбі за існування вони гальмують впровадження нових послуг у свої канали.

Великі радіомовні компанії, як правило, здійснюють і виробництво матеріалу. Однак вони часто є й власниками мереж, побудованих на конкуруючих платформах, і розглядають ефірні ТВ мережі тільки як один із численних способів поширення свого матеріалу.

Серйозну небезпеку для розвитку ефірних мереж ЦТ обумовлює конкуренція з іншими ТВ і іншими телекомунікаційними платформами, використовуваними для передавання аудіо й відео контенту. Вирішальною в цій конкуренції є вартість самих послуг у перерахунку на одного абонента.

За оцінками експертів Європейського союзу телевізійних дистриб'ютерів реакцією на появу цифрового ефірного ТВ стала консолідація операторів супутникових і кабельних платформ, що дозволить їм знизити питому вартість надаваних послуг.

У країнах, де домінує кабельна платформа, кабельні мережі є дуже серйозними конкурентами ефірних цифрових мереж.

Не дивно, що Нідерланди, Бельгія, Німеччина – країни з розвинутою кабельною інфраструктурою – не є піонерами в сфері цифрового ефірного телебачення.

Кабельні мережі можуть запропонувати й пропонують той же спектр інтерактивних платних послуг, що й ефірне телебачення, а гібридні й оптичні мережі, що набувають значного поширення останнім часом, забезпечують значно більш широку частотну смугу, ніж ефірні. Важливою перевагою кабельних мереж є й те, що вони не ділять спектр із іншими радіочастотними службами.

Обсяг даних і інших не радіомовних послуг, переданих цифровими ефірними мережами, доводиться законодавчо обмежувати. У Великобританії обсяг переданих не радіомовних послуг обмежений 10% спектра ефірного каналу. Аналогічні закони прийняті й в інших європейських країнах.

#### **4. Особливості впровадження систем цифрового телебачення**

За порівняльною оцінкою єдиною перевагою мереж DVB-T перед кабельними є можливість мобільного приймання. Саме тому в "кабельній" Німеччині випробування мобільних послуг роблять більш активно, ніж в інших європейських країнах. У країнах де домінує ефірна платформа цифрове телебачення має більше шансів зберегти лідерство, тому що модернізація й розгортання ефі-

рних мереж є значно дешевшою порівняно з кабельними. В Україні, незважаючи на деяке збільшення числа кабельних мереж і помітний розвиток супутникового мовлення, ефірне телебачення продовжує домінувати.

Серйозних проблем з пошуком вільного спектра в більшості регіонів України не виникне і розвиток ефірного ЦТ може гальмуватися тільки недостатнім фінансуванням мереж і низкою платоспроможністю населення. Деякі фахівці очікують у нас конкуренцію між супутниковою й ефірною платформою.

На сьогодні в Україні супутниковий спосіб доставки ТВ програм до місцевих розподільних мереж є незамінним. Показово, що в той момент, коли на Заході планують регіональні ТВ мережі на базі ефірного ЦТ, у нас іде процес формування регіональних цифрових супутникових мереж. Причина полягає у тому, що багато українських регіонів за розмірами можуть суперничати з великими європейськими країнами.

Проте, безпосереднє супутникове приймання телевізійних програм не є еквівалентом ефірних і кабельних мереж ні в районах з багатоквартирними будинками, ні в селах, ні в котеджних містечках. Досить згадати, що кожен абонент повинен мати свою зовнішню систему приймання, і що в багатьох регіонах вартість антени необхідного діаметра буде порівнянна з вартістю ефірної приставки. Тому більш доцільним варіантом здається сполучення доставки програм мережами DVB-S до ефірних центрів і їхнього місцевого поширення в стандарті DVB-T, з одночасною можливістю безпосереднього приймання супутникового сигналу. У такі комбіновані мережі можна вводити й інтерактивність. Сьогодні зворотний канал у супутникових і ефірних мережах реалізовано однаково – через телефонні лінії. Це має істотно полегшити реалізацію комбінованих інтерактивних мереж.

Викладені вище проблеми трохи гальмують поширення цифрового ефірного телебачення. Проте потенціал у нього великий, і позитивний досвід його впровадження вже є.

Комісія DigiTAG (Digital Terrestrial Television Action Group) зробила дослідження з метою виявити загальні закономірності розвитку цифрового ТВ у Європі, а також оцінити ситуацію в кожній країні окремо.

У результаті було визначено такі закономірності.

Ініціаторами впровадження цифрового мовлення найчастіше є суспільні (некомерційні) канали.

На початковому етапі провідну роль відіграють платні послуги. Надалі в розвитку платних послуг буде досягнуто насичення, обумовленого можливостями й потребами абонентів. Із цього моменту переважно набуде розвитку безкоштовне мовлення з наданням розширеного набору послуг.

Безкоштовні послуги мають допомогти ефірному ЦТ вижити в боротьбі з іншими ТВ платформами. У цьому основна роль також приділяється суспільним каналам. Телевізійні компанії повинні безкоштовно надавати спектр для нових послуг. Процес впровадження дуже прискорюють субсидії на одержання цифрових приставок, тому бажано, щоб у проектах брали участь великі виробники встаткування, здатні дозволити собі такі субсидії. Практично у всіх країнах передбачено, що ефірні цифрові мережі будуть в основному використовувати

ватися для передавання регіональних послуг. Що ж стосується характеру послуг, то всі телевізійні компанії згодні з тим, що введення інтерактивності є істотним чинником успіху цифрового телебачення.

У більшості країнах, що запустили DVB-T, інтерактивні послуги вже надаються. Так, шведський канал eTV доповнив музичні програми можливістю замовляти CD із записом композицій, що виконуються. Замовлення можна зробити за допомогою телевізійного пульта ДУ, яке пересилається модемом через телефонну лінію.

Як приклад додаткових послуг можна навести англійський канал On Digital, що запустив послуги електронної пошти й кілька варіантів послуг електронної комерції.

Наступним кроком On Digital стало надання у своєму пакеті повних послуг Інтернет. Додатково до цього планується вводити в телевізійні потоки посилення на Інтернет-Сайти з інформацією, що стосується змісту програми.

Платформи інтерактивного телебачення у різних країнах різні. Великобританія використовує MHEG-5, Швеція – Open TV, Іспанія – Open TV і Інтернет браузер розробки компанії Sagem. Деякі країни, зокрема Фінляндія, свого часу відклали запуск ефірного ЦТ до промислової появи MHP (Multimedia Home Platform) – стандартизованої DVB платформи інтерактивного телебачення. Вимоги до апаратного забезпечення ресиверів також різні. Зараз є три специфікації, що регламентують апаратні ресурси ресиверів – Британська, Скандинавська й недавно прийнята міжнародна Європейська (EACEM). Остання передбачає можливість установа MHP.

Більшість дистриб'ютерів вважає, що перевагу слід надавати впровадженню платформи-незалежних послуг, тобто не прив'язаних до ефірної цифрової платформи, однак, ця думка не є одностайною.

Крім інтерактивних послуг телевізійні компанії розраховують залучити аудиторію введенням додаткових аудіоканалів з високою якістю звуку, розширеного телетексту, що, разом з послугами реального часу, повиненні скласти конкуренцію паперовим періодичним виданнями, а також трансляцією широкоформатних (16/9) передач. У Великобританії вже зараз більше половини передач, трансльованих у пікові години, – широкоформатні. Із запуском цифрового ТВ там спостерігався бум продажів широкоформатних телевізорів.

Найменш ясна ситуація склалась поки з мобільним телебаченням.

З технічної точки зору можливості мобільного приймання досліджено досить детально.

З технічної точки зору введення послуг для мобільних і портативних прийомних систем гальмується тільки дуже слабкою потужністю цифрових сигналів, недостатньої для антен з маленьким коефіцієнтом підсилення. Через можливу інтерференцію з аналоговими ТВ сигналами їхня потужність не може бути істотно підвищена до відключення аналогового мовлення.

Набагато гірше пророблено питання про характер послуг, які повинні надаватися за допомогою мобільних мереж ЦТ. Телевізійні компанії деяких країн, наприклад Фінляндії, не збираються робити відмінності між змістом каналів мобільних і стаціонарних мереж. Але більшість фахівців схиляються до того,

що мобільні мережі повинні передавати специфічний набір програм, що містить переважно короткі фінансові й політичні новини, а також прогноз погоди. Підбор інформації повинен бути орієнтований на певний регіон. Деякі фахівці важливу роль відводять послугам за запитом. Однак у цій сфері системи UMTS явно складуть телебаченню серйозну конкуренцію, тому що подібні послуги вже реально запропоновані операторами мобільного телефонного зв'язку. Так що, мобільним телевізійним мережам переважно залишається коротка газетна інформація – зведення новин і прогноз погоди.



## Лекція 2

### СИСТЕМА НАЗЕМНОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ DVB-T

*Навчальні питання:*

- 1. Концепція DVB-T*
- 2. Загальна характеристика системи кодування та модуляції COFDM*
- 3. Попереднє оцінювання системних параметрів*
- 4. Режим ієрархічного передавання*
- 5. Варіативність параметрів DVB-T*
- 6. Процедури оброблення даних і сигналів в системі DVB-T.*

#### **1. Концепція DVB-T**

Концепцію DVB-T визначено європейським стандартом EN 300 744 (Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for terrestrial television). Вже із самої назви стандарту зрозуміло, що в ньому міститься опис процесу передавання сигналів цифрового телебачення через радіоканал наземного телебачення.

Стандарт містить детальну інформацію необхідну для розуміння принципів функціонування та технічного забезпечення системи цифрового телевізійного мовлення DVB-T. Розглянемо основні принципи функціонування DVB-T. Структурну схему процесу перетворення цифрового сигнального потоку телевізійної програми у передавальному обладнанні системи DVB-T наведено на рис.1. Зауважимо, що процес формування сигналу цифрового телевізійного мовлення складається з двох частин:

- формування транспортного потоку за стандартом MPEG-2;
- формування сигналу COFDM і перенесення його в частотну смугу відповідного телевізійного каналу.

Засобами системи передають дані, що є інформацією про зображення, звуковий супровід, а також будь-які додаткові відомості та дані. Умовою для передавання зазначеної інформації у системі DVB-T є тільки кодування цієї інформації у вигляді пакетів транспортного потоку MPEG-2. У цьому сенсі стандарт описує контейнер, пристосований для передавання пакетованих даних засобами наземного телебачення.

Для системи DVB-T ні зміст контейнера, ні походження даних не мають значення, вона лише пристосовує вхідні дані транспортного мультіплектора MPEG-2 до властивостей і характеристик каналу наземного телевізійного мовлення, і забезпечує найбільш ефективно їх передавання до приймача. Тобто, стандарт визначає структуру потоку даних, систему каналного кодування і модуляції для мультипрограмних служб наземного телебачення, що забезпечують передавання зображень у форматах обмеженої, стандартної, підвищеної та високої чіткості.

Для забезпечення сумісності пристроїв різних виробників у стандарті визначено параметри цифрового модульованого радіосигналу і наведено опис

процесу перетворення даних і сигналів передавальною частиною системи цифрового наземного телевізійного мовлення (рис. 1).

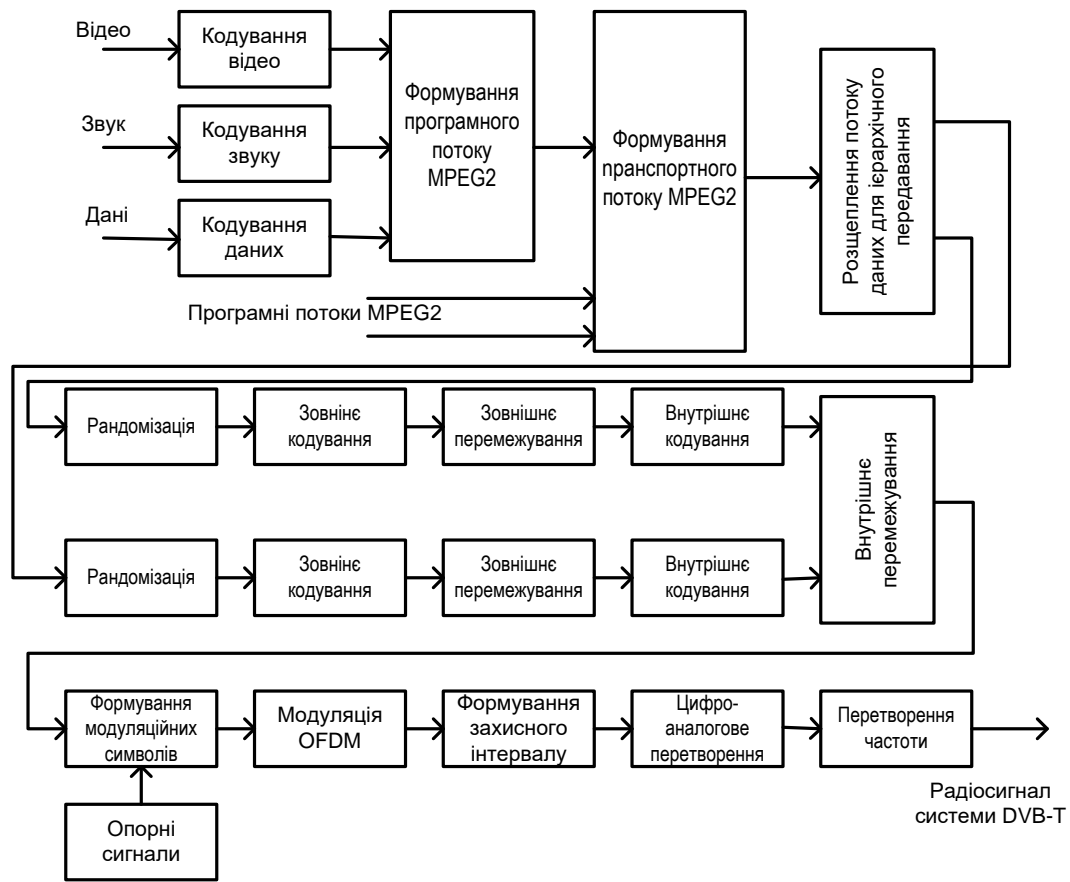


Рисунок 1 – Схема процесу перетворення сигнального потоку в передавальному обладнанні системи DVB-T

Особливістю DVB-T, як контейнера для передавання транспортних пакетів MPEG-2, є гармонійне поєднання системи каналного кодування і способу модуляції OFDM. Оброблення сигналів у приймачі не регламентовано стандартом. Це означає, що розробники стандарту не передбачали жорсткої регламентації принципів побудови приймача DVB-T. Відсутність жорсткого стандарту на приймач загострює конкуренцію між виробниками телевізорів і стимулює зусилля щодо створення високоякісних і дешевих апаратів. Приблизний варіант схеми приймача наведено на рис. 2.

## 2. Загальна характеристика системи кодування та модуляції COFDM

Систему DVB-T розроблено для цифрового мовлення з урахуванням того, що її будуть використовувати одночасно із системами аналогового телевізійного мовлення. Тому, технічні рішення, реалізовані в системі, забезпечують захист від шумових завад сусіднього та суміщеного каналів, обумовлених наявними передавачами PAL/SECAM. Оскільки мова йде про наземне мовлення, то слід було забезпечити максимальну ефективність використання частотного діа-

пазону. У системі передбачено можливість оптимального поєднання одиночних передавачів, багаточастотних і одночастотних телевізійних мереж.

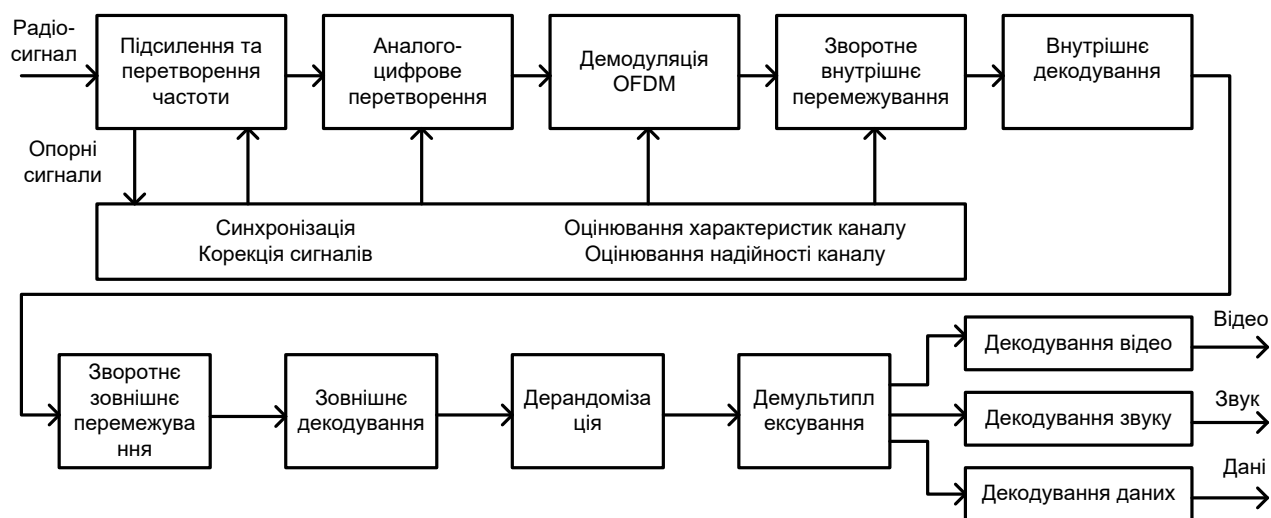


Рисунок 2 – Схема процесу перетворення сигналів і даних у приймачі DVB-T

Одним із чинників, що негативно впливає на якість приймання аналогових телевізійних сигналів, є багатопроменеве розповсюдження електромагнітних хвиль від передавача до антени абонентського пристрою. Для подолання зазначеного негативного впливу у системі DVB-T застосовано нову систему багато частотної модуляції OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex – ущільнення з розділенням ортогональними частотами). Такий спосіб модуляції крім іншого забезпечує приймання телевізійного сигналу під час руху й надійне приймання сигналу на невелику кімнатну антену.

Характерною ознакою OFDM порівняно з одно частотними способами модуляції носійної радіочастоти є одночасне використання великої кількості носійних коливань. Носійні частоти є ортогональними, що робить можливим їх демодуляцію навіть за умови часткового перекриття смуг окремих носійних. Багатопроменеве поширення радіосигналу в точку приймання (досить типове для наземного телебачення) призводить до ослаблення і навіть повного заглушення деяких носійних частот, які використано для формування OFDM сигналу, внаслідок накладання (інтерференції) прямого і затриманого сигналів. Збереження корисної інформації для такого випадку забезпечено застосуванням завадо захищеного кодування, що дає можливість виявити та виправити помилки в каналі передавання даних.

Застосування будь-якої однієї системи кодування не забезпечує надійного захисту інформації від руйнування під час розповсюдження каналами наземного телебачення, для яких характерним є прояв різноманітних шумів, завад і спотворень, що призводять до виникнення помилок з різними статистичними властивостями. За таких умов необхідно застосовувати більш складний алгоритм захисту від помилок. У системі DVB-T застосовано поєднання двох видів

кодування – зовнішнього і внутрішнього, розрахованих на боротьбу з помилками різної структури, частоти і статистичних властивостей. Ці способи кодування забезпечують у разі спільного застосування практично безпомилкову роботу (такий підхід типовий і для інших сфер, наприклад, для цифрового відеозапису). Якщо завдяки системі внутрішнього кодування частота помилок на виході внутрішнього декодера (рис. 2) не перевищує величини  $2 \cdot 10^{-4}$ , тоді система зовнішнього кодування доводить частоту помилок на вході демультіплексора MPEG-2 до значення  $10^{-11}$ , що відповідає практично безпомилковій роботі (помилка з'являється приблизно один раз протягом години).

Кодування обов'язково пов'язано з введенням в потік даних деякої надмірності і відповідно із зменшенням швидкості передавання корисних даних, тому нарощування потужності кодування за рахунок збільшення обсягу перевірюваних даних не завжди відповідає вимогам практики. Для збільшення ефективності кодування, без зниження швидкості коду, застосовують перемежування даних. Кодування дозволяє виявляти і виправляти помилки, а перемежування збільшує ефективність кодування, оскільки воно забезпечує розділення пакетних помилок на дрібні фрагменти, які надійно відновлює система кодування.

Додаткове кодування сигналу порівняно з системою OFDM обумовило зміну назви на COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex).

Детально ми розглянемо процес формування сигнальних потоків із застосуванням системи модуляції COFDM далі, але дуже важливим є розуміння принципів відмінностей зазначеної системи від одночастотних способів модуляції.

У разі застосування одночастотної цифрової модуляції застосовують багаторівневі способи модуляції (квадратурну амплітудну модуляцію – КАМ (QAM), відносну фазову маніпуляцію – ВФМ (QPSK) тощо), що призводять до швидкої зміни амплітуди і фази носійної частоти для кожного цифрового символу. Кожен цифровий символ передають протягом малого інтервалу часу, що обумовлено швидкістю надходження цифрового потоку. Швидка зміна параметрів модульованого сигналу обумовлює необхідність використовувати частотну смугу радіоканалу достатньо великої ширини, щоб забезпечити передавання сигналу з невеликими (прийнятними) спотвореннями, що забезпечують за ідеальних умов розповсюдження надійне їх детектування. Малий часовий інтервал, що припадає на кожен цифровий символ призводить до того, що у разі виникнення умов багатопробеневого розповсюдження, коли в точку приймання надходить кілька сигналів з різною затримкою розповсюдження, виникає міжсимвольна інтерференція, яка унеможливує детектування сигналу. (На вході детектора присутні одночасно модульовані радіочастотні сигнали, що передають поточний та попередній цифрові символи.)

У разі застосування багаточастотної модуляції OFDM з'являється можливість збільшити час передавання одного цифрового символу вхідного цифрового потоку у стільки разів, скільки носійних коливань використано одночасно. Весь подовжений час передавання цифрового символу розділено на дві частини. Перша частина – це та, коли має місце міжсимвольна інтерференція з попереднім символом, а друга – та, коли надходять сигнали тільки даного символу і

має місце внутрішньосимвольна інтерференція (робочий інтервал). Внутрішньосимвольна інтерференція призводить до певного спотворення амплітуди та фази корисного сигналу, але їх можна скоригувати, якщо знати передавальну характеристику каналу. У разі застосування системи OFDM вимірювання характеристики каналу здійснюють постійно, що дозволяє скоригувати параметри для більшості носійних радіочастот і здійснити їх правильне детектування. Під час детектування OFDM сигналу в приймачі протягом часу, коли має місце міжсимвольна інтерференція сигнал не детектують. **Заборонений для детектування інтервал називають захисним інтервалом.** Величину цього інтервалу встановлюють для кожної радіомовної системи залежно від характеристик зони обслуговування. Величина захисного інтервалу є системним параметром і може набувати значень, передбачених для кожної конкретної системи.

### 3. Попереднє оцінювання системних параметрів

Вибір параметрів системи OFDM пов'язано із забезпеченням роботи в одночастотних мережах телевізійного мовлення, а також з можливістю використання ретрансляторів в зоні охоплення телевізійним мовленням. Однак на початковому етапі розвитку цифрового телебачення одночастотні мережі знайдуть невелике застосування через необхідність співіснування з аналоговими передавачами і обмежень у розподілі частотних каналів. Крім того, в деяких країнах взагалі не планується використовувати одночастотної мережі. Отже, система мовлення має допускати найбільш ефективне використання частотного діапазону в рамках вже існуючих сітки частот та мережі передавачів.

**Одночастотною (single frequency – SF) мережею** називають таку телевізійну (або радіомовну) мережу, що складається з передавачів, розташованих на відстані у кілька десятків кілометрів, які одночасно узгоджено передають той самий контент в одному частотному каналі. Усі передавачі разом забезпечують спільну зону покриття, в якій усі абоненти можуть приймати сигнали однакових програм в однакових частотних каналах.

Величина захисного інтервалу для системи модуляції цифрового телевізійного сигналу залежить від відстані між передавачами в одночастотних мережах мовлення або від затримки сигналу відлуння в мережах телевізійного мовлення з традиційним розподілом частотних каналів. Чим більше час затримки, тим більше має бути тривалість захисного інтервалу. З іншого боку, для забезпечення максимальної швидкості переданого потоку даних захисний інтервал має бути якомога коротшим. На підставі аналітичних та практичних досліджень дійшли висновку, що для забезпечення необхідної пропускної здатності системи необхідно, щоб величина захисного інтервалу не перевищувала четвертої частина від величини корисного інтервалу. Попередні дослідження показали, що якщо одночастотні мережі будуть будуватися в основному з використанням наявних передавачів, тоді абсолютна величина захисного інтервалу має бути близько 250 мкс. Це дозволяє створювати великі одночастотні мережі регіонального рівня.

Якщо захисний інтервал 250 мкс становить четверту частину корисного інтервалу, тоді тривалість самого корисного інтервалу має бути встановлена на рівні близько 1 мс. Величина кроку частот носійних пов'язана з шириною основної пелюстки спектру одного модульованого носійного коливання і визначається величиною, оберненою до тривалості корисного інтервалу, тому відстань між сусідніми носійними OFDM сигналу дорівнюватиме приблизно 1 кГц. У разі ширини смуги частот каналу 8 МГц і кроці 1 кГц число носійних має дорівнювати 8000.

Зробимо приблизну оцінку того, які вимоги до модуляції кожної носійної OFDM сигналу виникають у разі застосування визначеної вище кількості носійних частот. Для забезпечення телевізійного зображення звичайної чіткості стандартної якості необхідно забезпечити передавання програмного цифрового потоку кодованого за системою MPEG-2 зі швидкістю 5...10 Мбіт/с, а для телебачення високої чіткості (ТВЧ) достатньо швидкості потоку даних 20 Мбіт/с (на практиці 10...12 Мбіт/с). Для випадку ТВЧ за 1 мс необхідно передано 20 кбіт, що дає менше 3 бітів на одну носійну за час одного символу OFDM. Передавання такого цифрового потоку може бути реалізовано з використанням 8-позиційної модуляції для кожної носійної частоти, що забезпечує досить високий ступінь завадозахищеності.

Звичайно виникає природне питання, а яким способом можна одночасно здійснити багаторівневу модуляцію кількох тисяч носійних, що передбачено системою OFDM?

Застосування восьми тисяч синтезаторів носійних коливань і восьми тисяч модуляторів зробило б таку систему передавання дуже громіздкою і дорогою. Дійсно, традиційними способами OFDM для потреб телебачення реалізувати не доцільно. OFDM вдалося доволі просто реалізувати на практиці (хоча самі процедури реалізації є доволі складними, як для розуміння так і для втілення) завдяки тому, що теоретичний (формульний) опис OFDM модульованого сигналу співпадає з описом оберненого перетворення Фур'є. Для демодуляції такого сигналу необхідно зробити пряме перетворення Фур'є прийнятого відеосигналу. Існування добре відпрацьованих швидких алгоритмів перетворення Фур'є і промисловий випуск інтегральних схем процесорів забезпечили практичну реалізацію системи OFDM.

Нагадаю, що відеосигналом у радіотехніці називають безпосередньо інформаційний сигнал – сигнал без модуляції, незалежно від його походження. Це може бути сигнал зображення, звуковий сигнал або сигнал від будь-якого аналізатора чи датчика.

Розмір масиву даних, для якого найбільш ефективно застосувати алгоритми швидкого перетворення Фур'є кратний числу, що є цілим степенем числа 2. Для здійснення такого перетворення можна, наприклад, використовувати масиви розміром  $N = 2^{13} = 8192 = 8k$  або  $N = 2^{11} = 2048 = 2k$  (де  $k = 1024$ ).

На практиці використовують не всі носійні частоти для передавання корисної та службової інформації, оскільки треба забезпечити певні захисні частотні проміжки між суміжними частотними телевізійними каналами. У двох запропонованих на тепер режимах використовують 6817 і 1705 носійних, але за

розмірністю масиву для швидкого перетворення Фур'є системи модуляції називаються відповідно 8k OFDM і 2k OFDM. Для тих частот масиву, які не використовують для передавання корисної інформації (частоти на краях робочої смуги частот) під час оберненого перетворення Фур'є застосовують коефіцієнти, що дорівнюють нулю.

У наведеному вище поясненні описано загальні принципи системи OFDM. Для кращого розуміння, кожен з них потребує додаткового пояснення. Такі пояснення буде наведено нижче.

#### **4. Режим ієрархічного передавання**

Крім описаного вище режиму кодування і модуляції OFDM, у системі DVB-T передбачено можливість ієрархічного передавання та приймання цифрових сигнальних потоків.

Ідея ієрархічного передавання полягає в тому, що модульований OFDM сигнал містить два потоки, що передають з різними параметрами модуляції – з підвищеною завадостійкістю та із зменшеною завадостійкістю. Менш швидкісний потік може забезпечити передавання телевізійних програм на рухомі та переносні приймачі, а також приймачі, що знаходяться в зоні дії значних електромагнітних завад. Потік з меншою завадостійкістю можна використовувати для додаткового передавання кількох телевізійних програм у форматі звичайної чіткості або у форматі ТВЧ на стаціонарні телевізійні приймачі.

Для забезпечення режиму ієрархічного передавання дані на виході мультиплектора транспортного потоку розщеплюють на два незалежних транспортних потоки MPEG-2 (рис. 1), яким надають різні ступені пріоритету. Кожен із цих потоків є окремим програмним потоком.

Кодування обох потоків здійснюють окремо, а потім обидва кодованих потоки об'єднують і використовують для здійснення завершального етапу модуляції OFDM.

#### **5. Варіативність параметрів DVB-T**

Систему DVB-T було створено не просто для цифрового наземного телебачення, а для задоволення найрізноманітніших вимог, характерні для країн, що переходять до цифрового наземного мовлення. Оскільки умови розповсюдження сигналів у різних регіонах можуть суттєво відрізнятись, це змусило передбачити можливість роботи системи в різних режимах без значного ускладнення абонентських приймачів.

Для роботи окремих передавачів або окремих мереж може бути використано режими роботи з різною кількістю носійних. Це обумовлено тим, що одні країни від початку планують введення великих одночастотних мереж, а інші не планують використовувати такі мережі. Як ми вже зазначали у стандарті DVB-T передбачено два режими роботи: 2k і 8k.

Режим 2k призначено головним чином для окремих передавачів та малих мереж, 8k – для великих мереж, хоча його можна застосовувати і для окремих передавачів.

Для забезпечення можливості якнайкраще адаптувати мережу телевізійного мовлення до реальних умов у системі DVB-T передбачено можливість здійснювати обмін між швидкістю передавання даних та завадозахищеністю.

Уведення захисного інтервалу дозволяє ефективно боротися з несприятливими наслідками багатопроменевого розповсюдження радіосигналів. Однак застосування великого захисного інтервалу призводить до зменшення швидкості передавання корисних даних. Для того, щоб зберегти більшу швидкість передавання даних в ситуаціях, де не потрібні великі одночастотні мережі або майже відсутнє багатопроменеве поширення хвиль, передбачено різні можливі значення величини захисного інтервалу (1/4, 1/8, 1/16 і 1/32 від довжини корисного інтервалу).

Додаткової гнучкості надає системі можливість варіювати швидкістю внутрішнього коду, що забезпечує виявлення та виправлення одиничних бітових помилок. Швидкість внутрішнього коду може набувати таких значень: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8.

У системі DVB-T передбачено також можливість зміни числа позицій модульованого сигналу від 4 до 64 (від КАМ-4 (два біти на кожному носійну) до КАМ-64 – 6 бітів на носійну).

Розподіл частотних каналів в різних країнах здійснюють з різним кроком сітки частот, наприклад, 8, 7 або 6 МГц. У системі DVB-T можливість налаштування телевізійної мережі до того чи іншого частотного плану передбачено здійснювати доволі просто – шляхом заміни системної тактової частоти зі збереженням усієї структури оброблення сигналів.

Вибором комбінації параметрів щодо способу модуляції і числа носійних коливань, швидкості внутрішнього коду і величиною захисного інтервалу, можна створити систему наземного мовлення, що забезпечує надійне функціонування за різних умов.

Важливою характеристикою DVB-T є високий ступінь подібності системи наземного телевізійного мовлення з іншими системами цифрового телебачення: кабельним (DVB-C) та супутниковим (DVB-S).

## **6. Процедури оброблення даних і сигналів в системі DVB-T. Формування квазівипадкової послідовності (Рандомізація)**

Рандомізація даних є першою процедурою у системі формування радіомовного сигналу DVB-T (рис. 1). Цю процедуру здійснюють, щоб перетворити цифровий сигнал програмного потоку у квазівипадковий сигнал з метою надати випромінюваному радіосигналу певних властивостей.

Квазівипадкова цифрова послідовність характеризується тим, що ймовірність появи нуля та одиниці у такій послідовності однакова й дорівнює 0,5.



По-перше, це дозволяє створити в цифровому сигналі досить велику кількість перепадів рівня та забезпечити можливість виділення з нього тактових імпульсів (таку властивість сигналу називають самосинхронізацією).

По-друге, рандомізація призводить до формування більш однорідного енергетичного спектру випромінюваного радіосигналу (як відомо, спектральна щільність потужності випадкового шуму постійна на всіх частотах, тому перетворення сигналу у квазівипадковий сприяє вирівнюванню його спектра). Завдяки рівномірному спектру підвищується ефективність роботи передавача і зменшується вплив радіосигналу цифрового телебачення по відношенню до аналогового телевізійного сигналу, що випромінюється іншим передавачем в тому ж каналі.

Рандомізація починається з процедури адаптації цифрового потоку, що складається з послідовності транспортних пакетів *MPEG-2* (рис. 3). Пакети, що мають загальну довжину 188 байтів (синхробайт, що має структуру числа  $47H = 01000111_2$ , і 187 байтів даних), об'єднують у групи по вісім пакетів.

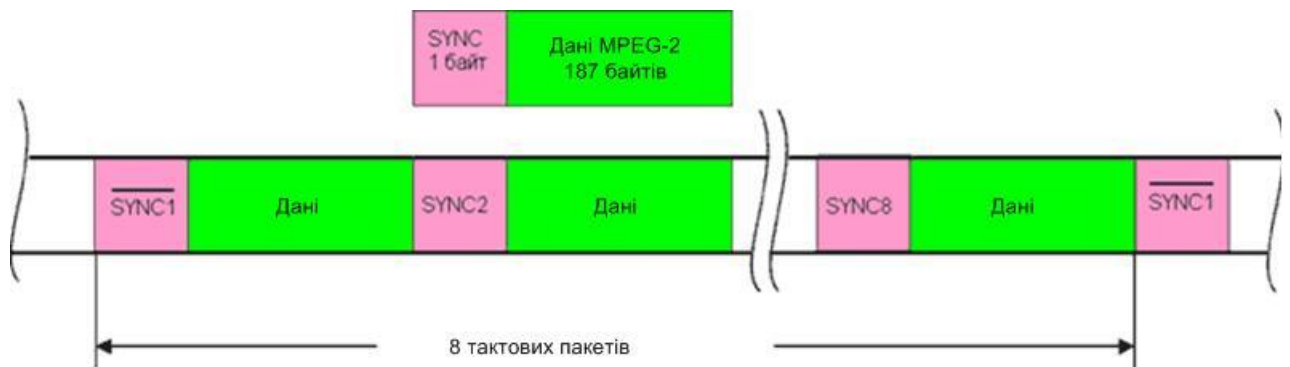


Рисунок 3 – Схема адаптації транспортних пакетів MPEG-2

**Синхробайт першого пакету групи** інвертують, внаслідок чого утворюється послідовність  $10111000_2 = B816$ . Власне рандомізацію здійснюють шляхом побітного додавання за модулем 2 (XOR) до цифрового потоку даних двійкової псевдовипадкової послідовності (*PRBS – Pseudo Random Binary Sequence*).

Генератор послідовності *PRBS* побудовано з використанням 15-розрядного регістра зсуву, охопленого колом зворотного зв'язку (рис. 4). Для того, щоб сформована послідовність лише походила на випадкову і в приймачі можна було б відновити передані дані, на початку кожного восьмого пакету здійснюють ініціалізацію генератора *PRBS* шляхом завантаження в нього числа  $100101010000000_2$ .

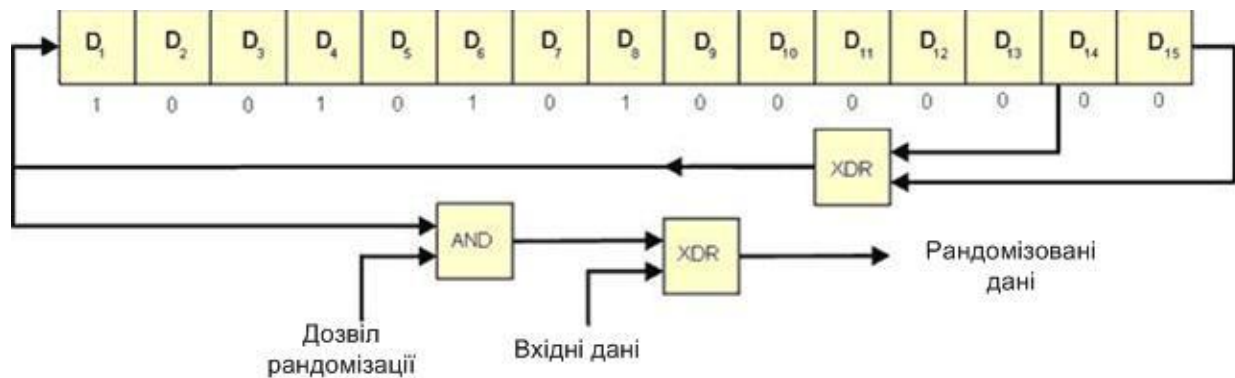


Рисунок 4 – Схема для створення квазівипадкової послідовності із сигнального потоку *DVB-T*

Перший після ініціалізації біт псевдовипадкової послідовності PRBS додають до першого біта першого байта транспортного потоку, наступного за інвертованим байтом синхронізації. Байти синхронізації транспортних пакетів не зазнають рандомізації. Генератор *PRBS* змінює свій стан з кожним імпульсом тактової послідовності під час усіх восьми пакетів, але в інтервалі синхробайтів додавання з псевдовипадковою послідовністю не відбувається (для цього використовують сигнал дозволу) і синхробайти залишаються без змін. Таким чином, тривалість псевдовипадкової послідовності дорівнює 1503 байти ( $187 + 188 \cdot 7 = 1503$ ).

Відновлення початкових даних на приймальній стороні здійснюють за допомогою такого ж генератора *PRBS*, який ініціалізують на початку кожної групи з восьми пакетів адаптованого транспортного потоку (на початок групи вказує інвертований синхробайт пакета).

### Зовнішнє кодування і перемешування

Як уже було зазначено у системі *DVB-T* застосовано два види завадозахищеного кодування: зовнішнє та внутрішнє. Такі назви ці різновиди кодування отримали за їх місцезнаходженням у процесі передавання сигнальних потоків. Внутрішнє кодування здійснюють ближче до процедури безпосереднього передавання радіочастотною лінією, а зовнішнє, відповідно, – далі.

#### **Властивості кодів Ріда-Соломона**

Коди Ріда-Соломона є частковим набором кодів *BCH* (Боуза – Чоудхурі – Хоквінгема). Ці коди є лінійними блоковими кодами. Код Ріда-Соломона позначають як  $RS(n, k)$   $s$ -бітних символів. Це означає, що у кодувальнику до  $k$  інформаційних символів по  $s$  бітів кожний додають символи парності для формування  $n$  символного кодового слова. У результаті утворюється  $n-k$  символів парності по  $s$  бітів кожен. Декодер Ріда-Соломона може коригувати до  $t$  символів, що містять помилки в кодовому слові, де  $2t = n-k$ . На рис.5, наведено типову структуру кодового слова Ріда-Соломона.

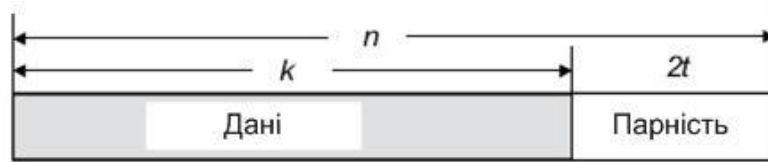


Рисунок 5 – Структура кодового слова RS

**Приклад.** Популярним кодом Ріда-Соломона є  $RS(255, 223)$  з 8-бітними символами. Кожне кодове слово містить 255 байтів, з яких 223 є інформаційними і 32 байтами парності. Для цього коду  $n = 255$ ,  $k = 223$ ,  $s = 8$ ,  $2t = 32$ ,  $t = 16$ . Декодер може виправити будь-які 16 символів з помилками в кодовому слові: тобто помилки можуть бути виправлені, якщо число спотворених байтів не перевищує 16. За умови, що розмір символу  $s$ , максимальна довжина кодового слова ( $n$ ) для коду Ріда-Соломона дорівнює  $n = 2^s - 1$ . Тобто, максимальна довжина коду з 8-бітними символами ( $s = 8$ ) дорівнює 255 байтам.

У системі зовнішнього кодування DVB-T для захисту всіх 188 байтів транспортного пакета (разом з байтом синхронізації) застосовують код Ріда-Соломона. У процесі кодування до цих 188 байтів додають 16 перевірючих байтів (рис. 6). Під час декодування на приймальній стороні це дозволяє виправляти до восьми помилкових байтів в межах кожного кодового слова довжиною 204 байта.

Для запобігання виникненню великих блокових помилок внаслідок пошкодження радіосигналу зовнішніми завадами після зовнішнього кодування здійснюють розпорошення байтів у часі (перемежування).

Зовнішнє перемежування здійснюють шляхом зміни порядку проходження байтів в пакетах, захищених від помилок. У відповідності зі схемою, наведеній на рис. 6, перемежування виконують шляхом послідовного циклічного підключення джерела і одержувача даних до дванадцяти гілок схеми, в якій за одне підключення до гілки спрямовують і з гілки знімають 1 байт даних. В одинадцяти гілках знаходяться регістри зсуву, що містять різну кількість чарунк (кожна чарунка зберігає байт даних) і створюють збільшувану від гілки до гілки затримку. Вхідний і вихідний перемикачі синхронізовано. Запропонована схема не порушує періодичність та порядок проходження байтів синхронізації. Перший синхробайт спрямовують у гілку з номером 0, яка не робить затримки. Після сімнадцяти циклів комутації перемикачів через пристрій пройде 204 байти ( $12 \cdot 17 = 204$ , що збігається з довжиною кодового слова, в яке перетворено пакет даних після кодування Ріда-Соломона). Отже, наступний байт синхронізації знову пройде через гілку з нульовою затримкою.

Перемежування є перемішуванням в часі байтів даних. В приймачі початковий порядок проходження байтів даних відновлюється. Внаслідок перемежування довгі пакетні помилки, обумовлені шумами і завадами в каналі зв'язку, що призводять до безперервної послідовності спотворених байтів даних, в результаті зворотного перемежування в приймачі розподіляються на невеликі фрагменти, що знаходяться у різних кодових словах коду Ріда-Соломона.



Рисунок 6 – Структура пакетів даних на вході і виході кодувальника Ріда-Соломона  $RS(204, 188)$

У кожне кодове слово потрапляє лише мала частина пакетної помилки, з якою легко може впоратись система виявлення та виправлення помилок із застосуванням порівняно невеликого обсягу перевірових даних.

Пряме і зворотне перемешування здійснюють за допомогою практично однакових схем, але тільки порядок зміни затримки в гілках схеми зворотного перемешування в приймальному пристрої має бути змінений на протилежний (рис. 7). Синхронізацію пристроїв прямого і зворотного перемешування здійснюють шляхом спрямування першого ж виявленого байта синхронізації через гілку з номером 0.

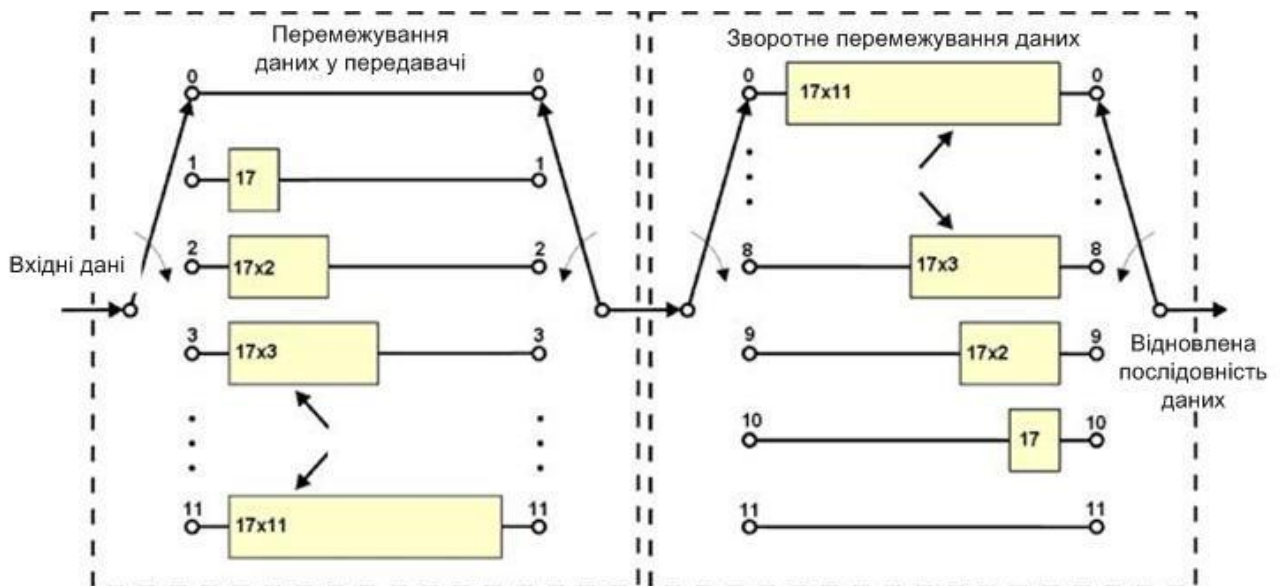


Рисунок 7 – Схема зовнішнього перемешування даних

### Внутрішнє кодування

Внутрішнє кодування в системі DVB-T здійснюють згортковим кодом (рис.8). Таке кодування принципово відрізняється від зовнішнього, яке є представником блокових кодів. Під час блокового кодування потік інформаційних символів розподіляють на блоки фіксованої довжини, до яких в процесі коду-

вання додають певну кількість перевіркових символів. Кодування кожного блоку здійснюють незалежно від інших.

У процесі загорткового кодування потік даних також розділяють на блоки, але набагато меншої довжини, їх називають «кадрами інформаційних символів». Зазвичай кадр складається лише з кількох бітів. До кожного інформаційного кадру також додають перевірочні символи, в результаті чого утворюються кадри кодового слова, але кодування кожного кадру відбувається з урахуванням попередніх інформаційних кадрів. Для цього в кодері завжди зберігається деяка кількість попередніх кадрів інформаційних символів, доступних для кодування чергового кадру кодового слова (кількість інформаційних символів, що використовують у процесі згорткового кодування, часто називають «довжиною кодового обмеження»). Формування кадру кодового слова супроводжується введенням наступного кадру інформаційних символів. Таким чином, процес кодування пов'язує між собою послідовні кадри.

Як було вже сказано, швидкість внутрішнього коду, або відношення числа символів в інформаційному кадрі до загального числа символів, що передаються в одному кодованому кадрі, може змінюватись залежно від умов передавання даних в каналі зв'язку та вимог до швидкості передавання даних. Чим більше швидкість коду, тим менше його надмірність і тим менше його здатність виправляти помилки в каналі зв'язку.

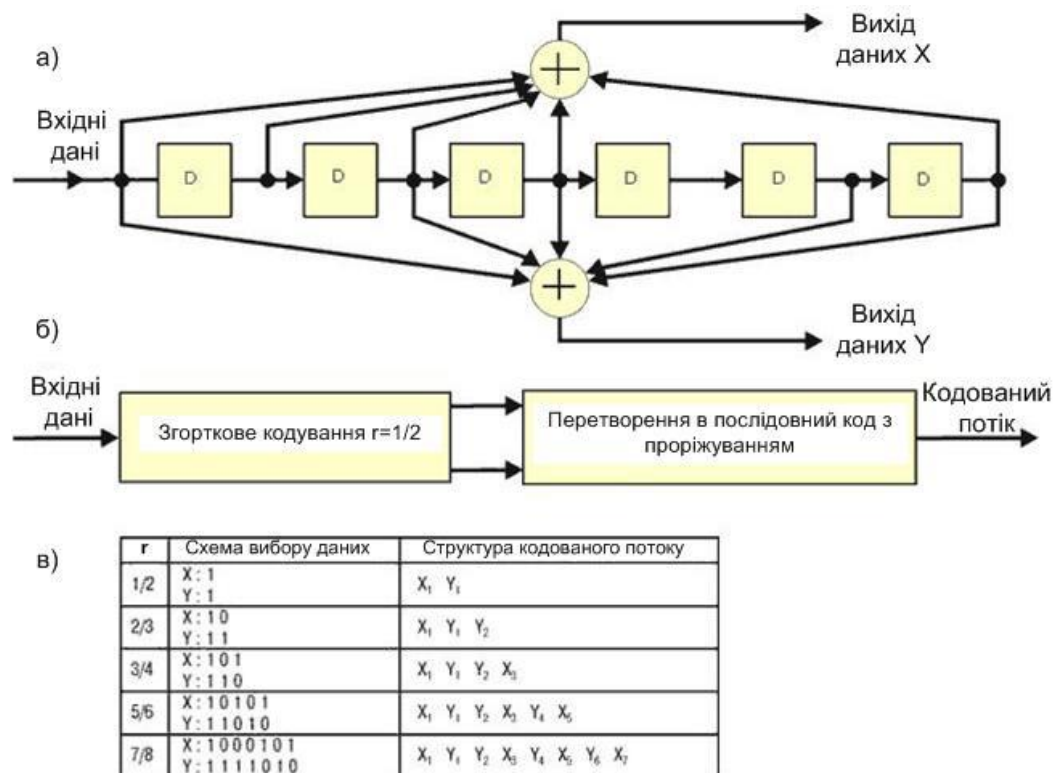


Рисунок 8 – Схема процесу внутрішнього кодування: а) – схема основного кодера зі швидкістю  $r = 1/2$ , б) – схема кодування з викреслюванням, в) – таблиця кодування

У системі DVB-T внутрішнє кодування із змінною швидкістю організовано з використанням основного кодування зі швидкістю  $1/2$ . Основний кодер реалізовано на двох цифрових фільтрах з кінцевою імпульсною характеристикою. Вихідні сигнали цих фільтрів  $X$  і  $Y$  формуються шляхом додавання за модулем 2 двох сигналів, знятих з різних точок лінії затримки у вигляді регістра зсуву з шести тригерів (рис. 8).

Вхідні дані послідовно надходять в регістр зсуву. Вихідні сигнали фільтрів після перетворення упорядковують в новий послідовний цифровий потік, в якому біти надходять у два рази частіше, ніж на вході (швидкість такого коду дорівнює  $1/2$ , оскільки на кожен вхідний біт припадає два вихідних).

У режимах з більшою швидкістю кодування передають лише частину згенерованих сигналів  $X$  і  $Y$ . Передані сигнали і їх порядок наведені в таблиці рис.7. Наприклад, за швидкості  $2/3$  двом вхідним бітам ставлять у відповідність і передають в послідовній формі три вихідних сигналу ( $X1, Y1, Y2$ ), а  $X2$  не передають. За максимальної швидкості внутрішнього коду, що дорівнює  $7/8$ , семи вхідним бітам ставлять у відповідність вісім вихідних ( $X1, Y1, Y2, Y3, Y4, X5, Y6, X7$ ).

## Лекція 3

### ФОРМУВАННЯ РАДІОСИГНАЛУ У СИСТЕМІ НАЗЕМНОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ DVB-T

Навчальні питання:

1. Внутрішнє перемешування
2. Формування модуляційних символів
3. Перемешування і формування модуляційних символів у разі ієрархічного передавання
4. Зв'язок між модуляцією OFDM та перетворенням Фур'є
5. Особливості багатопроменевого приймання OFDM сигналу
6. Форматування даних та структура радіосигналів системи DVB-T

#### 1. Внутрішнє перемешування й формування модуляційних символів

Внутрішнє перемешування в системі DVB-T безпосередньо пов'язане з модуляцією носійних коливань. Воно фактично є частотним перемешуванням і забезпечує перемішування даних, які модулюють різні носійні коливання. Це досить складний процес, що передбачено основними принципами модуляції OFDM у системі DVB-T. Внутрішнє перемешування складається з перемешування бітів і перемешування цифрових символів даних. Його першим етапом є демультимплексування (розгалуження) вхідного потоку даних. Безпосередньо за перемешуванням здійснюють формування модуляційних символів для кожного носійного коливання.

#### Демультимплексування

Для модуляції кожної окремої носійної частоти у системі DVB-T може бути застосовано чотирифазну маніпуляцію ВФМ-4 (*QPSK – Quaternary Phase Shift Keying*) або квадратурну амплітудну модуляцію КАМ (*QAM – Quadrature Amplitude Modulation*).

Треба згадати, що під час реалізації обох зазначених способів модуляції спочатку здійснюють модуляцію двох ортогональних носійних коливань – синфазного ( $Q \rightarrow U_0 \cos(\omega t)$ ) та квадратурного ( $I \rightarrow U_0 \sin(\omega t)$ ), а потім додають ці два окремо модульовані коливання

$$u_{QAM}(t) = I_k \cos \omega t + Q_k \sin \omega t = A_k \cos(\omega t + \varphi_k). \quad (1)$$

Амплітуди синфазної та квадратурної складових визначають за числовими значеннями груп символів, які використовують для модуляції даної носійної. Так, у разі застосування модуляції ВФМ-4 (*QPSK*) одна ВФМ модульована носійна може передати інформацію описану двома бітами. Для здійснення модуляції використовують певну таблицю відповідності модуляційних символів

(табл.1). Після детектування в приймачі за цією ж таблицею відновлюють значення бітів прийнятого цифрового сигналу.

*Кратністю модуляції* називають максимальну кількість станів модульованого коливання, які воно може набути в результаті зміни значень окремих бітів групи цифрових сигналів, використаних для модуляції. У розглянутому вище прикладі (QPSK – чотирифазна маніпуляція) кратність модуляції дорівнює 4, тому вітчизняне позначення для даного виду модуляції містить в позначенні число 4 (ВФМ-4). Для аналізу модульованих коливань застосовують фазову діаграму. Якщо зобразити миттєві значення модульованого коливання векторами на такій діаграмі, то вони можуть бути розташовані в одній з чотирьох позицій. Тому, модульовані коливання також часто характеризують максимальною кількістю позицій, яких може набути вектор модульованого коливання на векторній діаграмі. Для ВФМ-4 таку діаграму наведено на рис.9. У термінах кратності таку модуляцію називають чотирипозиційною.

Таблиця 1.

Значення бітів групи цифрового сигналу	Значення модулюючих символів	
	$I_k$	$Q_k$
00	1	1
01	1	-1
10	-1	1
11	-1	-1

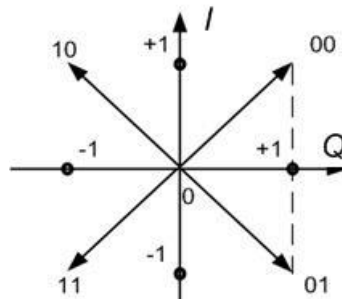


Рисунок 9 – Фазова діаграма ВФМ-4 сигналу

Як впливає із наведеного пояснення, для здійснення зазначених різновидів модуляції частину цифрового потоку, яку передають одним символом *OFDM* необхідно розділити на групи відповідно до кратності обраної модуляції. Кожну групу бітів передають окремим носійним коливанням. Половину бітів кожної групи використовують для формування сигналу, що модулює синфазну складову ( $Q$ ), а другу половину – для квадратурної ( $I$ ).

Для формування модуляційних символів (груп бітів) вхідний послідовний потік бітів треба розподілити, або іншими словами демультимплексувати на два субпотіки, в кожному з яких тактова частота буде в два рази менше, ніж на вході (рис. 10). Для 16-позиційної квадратурної амплітудної модуляції 16-КАМ (*QAM*) треба формувати модуляційні символи у вигляді 4-розрядних двійкових



груп, що визначають фазу і амплітуду модульованого коливання. У цьому випадку вхідний потік треба демультимплексувати відповідно на чотири субпотіки. У разі застосування модуляції 64-QAM (*QAM*) модуляційні символи є 6-розрядними групами (словами), тому вхідний потік демультимплексують на шість субпотоків.

Таким чином, вхідний потік даних демультимплексують на  $v$  субпотоків ( $v = 2$  для *QPSK*,  $v = 4$  для 16-*QAM*,  $v = 6$  для 64-*QAM*). Потік бітів  $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots$  перетворюється в послідовність слів (груп) з  $v$  розрядів (рис. 10). У разі використання *QPSK* два послідовних біта  $x_0, x_1$  перетворюються у слово, подане в паралельній формі і складається з бітів  $b_{0,0}$  і  $b_{0,1}$ , біти  $x_2, x_3$  – у слово з бітів  $b_{1,0}$  і  $b_{1,1}$  тощо. Перший індекс – номер субпотіку, другий – номер слова.

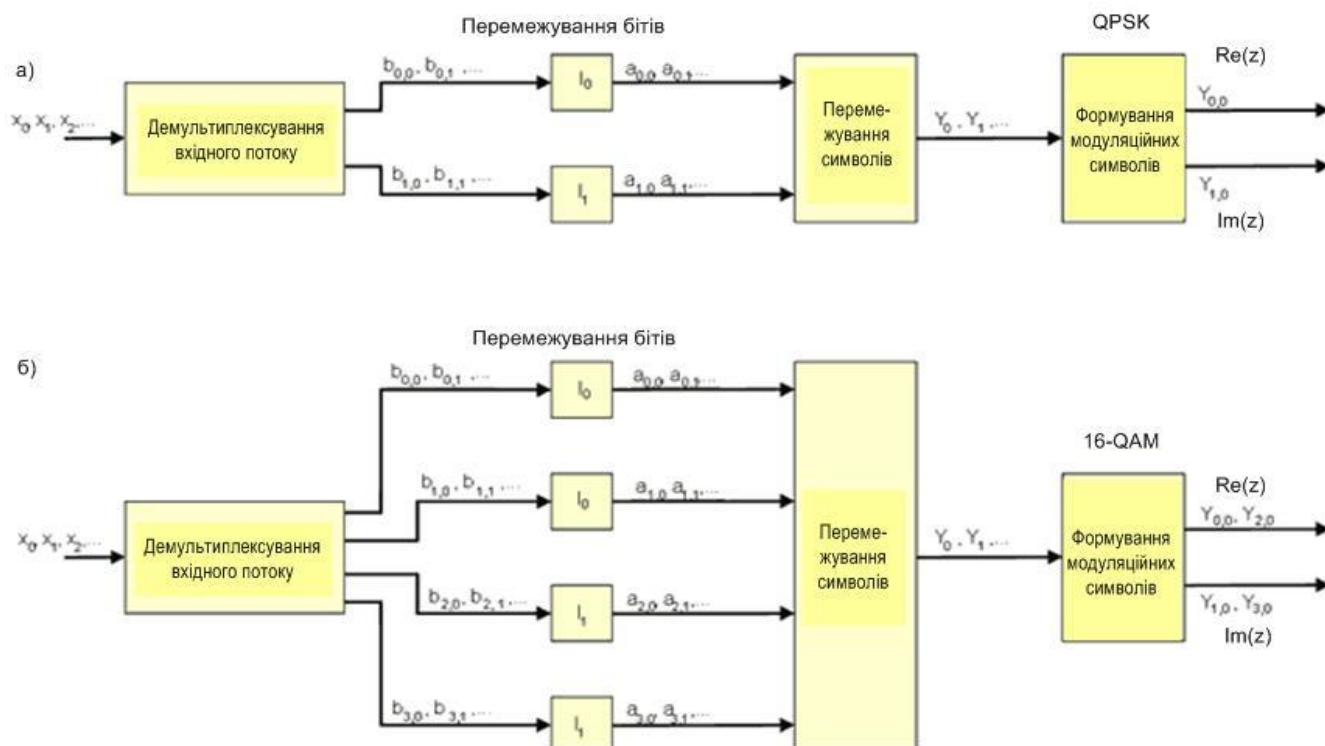


Рис.10. Схеми внутрішнього перемежування й формування модуляційних символів: а) – *QPSK*, б) – 16-*QAM*

У разі модуляції 16-*QAM* здійснюють перетворення вхідного послідовного потоку на чотири субпотіки, як це наведено на рис.10,б.

У разі модуляції 64-*QAM* кожні шість послідовних бітів перетворюються в 6-розрядне слово аналогічним чином.

### Перемежування бітів

Перемежування бітів є блоковим процесом, тобто його здійснюють у межах фіксованої множини даних. Перемежування бітів виконують в межах послідовності зі 126 бітів субпотіку (рис. 10). Його здійснюють тільки для корисних даних. В кожному з субпотіків (їх максимальна кількість дорівнює шести) перемежування здійснюють за окремим правилом. У процесі перемежування в

кожному з субпотоків формують вхідний бітовий вектор  $B(e) = (b_{e,0}, b_{e,1}, \dots, b_{e,125})$ , перетворений у вихідний  $A(e) = (a_{e,0}, a_{e,1}, \dots, a_{e,125})$ , елементи якого визначаються як  $a_{e,w} = b_e$ ,  $H_e(w)$  (тут  $H_e(w)$  – функція перестановки бітів,  $e = 0, 1, \dots, v-1$ ,  $w = 0, 1, 2, \dots, 125$ ). Функція перестановки визначається різним чином для схеми перемежування кожного субпотoku. Наприклад, для субпотoku  $I_0$  на схемі рис.10,а функція  $H_0(w) = w$  – перестановка фактично відсутня, а для субпотoku  $I_1$  перестановка виконується відповідно до функцією  $H_1(w) = (w + 63) \bmod 126$ . Тобто, усі біти субпотoku  $I_1$  циклічно переміщують на 63 позиції в межах блоку зі 126 бітів.

## Цифровий символ даних і символ OFDM

Для утворення цифрового символу даних виходи пристроїв перемежування субпотоків об'єднано таким чином, що кожен символ з  $v$  бітів (слово  $u(w)$ , де  $w = 0, 1, 2, \dots, 125$ ) містить один біт з виходу кожного пристрою. Вихід каналу  $I_0$  дає старший біт. У режимі 2k для формування одного OFDM символу здійснюють перемежування 12 блоків, в результаті чого утворюються пакет з 1512 цифрових символів даних ( $126 \cdot 12 = 1512$ ), який і називають *символом OFDM*. Саме ці 1512 цифрових символів даних використовують для модуляції 1512 носійних коливань протягом інтервалу одного символу OFDM (тривалість символу OFDM позначають як TS). 12 груп по 126 слів, зчитаних послідовно з виходу пристрою бітового перемежування, утворюють вектор  $Y = (y_0, y_1, \dots, y_{1511})$ . У режимі 8k для формування OFDM символу здійснюють послідовно процес бітового перемежування для 48 блоків по 126 слів, що забезпечує формування 6048 цифрових символів даних ( $126 \cdot 48 = 6048$ ), необхідних для модуляції 6048 носійних частот. У такому разі формують вектор  $Y = (y_0, y_1, \dots, y_{6047})$ .

Перед формуванням модуляційних символів додатково здійснюють перемежування цифрових символів даних. Перестановку символів  $y_k$  здійснюють у межах блоку з 1512 (режим 2k) або 6048 (режим 8k) символів.

## 2. Формування модуляційних символів

Цифровий символ даних « $u$ » складається з  $v$  бітів (так само як і  $u'$ ):  $u'_q = (u_{0,q'}, u_{1,q'}, \dots, u_{v-1,q'})$ , де  $q'$  – номер символу на виході пристрою символного перемежування. Значення цифрових символів « $u$ » використовують для формування модуляційних символів відповідно з обраним способом модуляції носійних частот. Модуляційні символи  $z$  розглядають як комплексні величини, їх дійсну і уявну частини відображають бітами  $u_{u,q'}$ . Відповідність між бітами  $u_{u,q'}$  і модуляційними символами наведено на спрощених векторних діаграмах рис.11,а – модуляція QPSK, рис.11,б – однорідна модуляція 16-QAM). Спрощену векторну діаграму, на якій зображають точками лише кінець вектора модульованого коливання, називають *модуляційним сузір'ям* або просто сузір'ям.

Відповідність між модуляційними і цифровими символами визначено із застосуванням коду Грея, тому сусідні по горизонталі і вертикалі символи мають відмінності тільки в одному біті. Таку відповідність модуляційних симво-

лів було запропоновано для того, щоб забезпечити однакову ймовірність правильного детектування усіх реалізацій модульованого коливання.

Розглянемо діаграму QPSK сигналу. Значення дійсної та уявної частин комплексного модуляційного символу мають цілком конкретний реальний сенс. Вони означають, що амплітуди синфазної  $I$  і квадратурної  $Q$  компонент модульованого коливання дорівнюють 1. У процесі модуляції косинусоїдальну (синфазну) та синусоїдальну (квадратурну) складові додають з однаковими одиничними амплітудами. Як відомо, сума косинусоїдальної та синусоїдальної функцій з одиничними амплітудами дає гармонійне косинусоїдальне коливання з амплітудою, що дорівнює  $\sqrt{2}$ , і початковою фазою  $45^\circ$  (це і відповідає вектору, розташованому в першому квадранті діаграми на рис. 11,а).

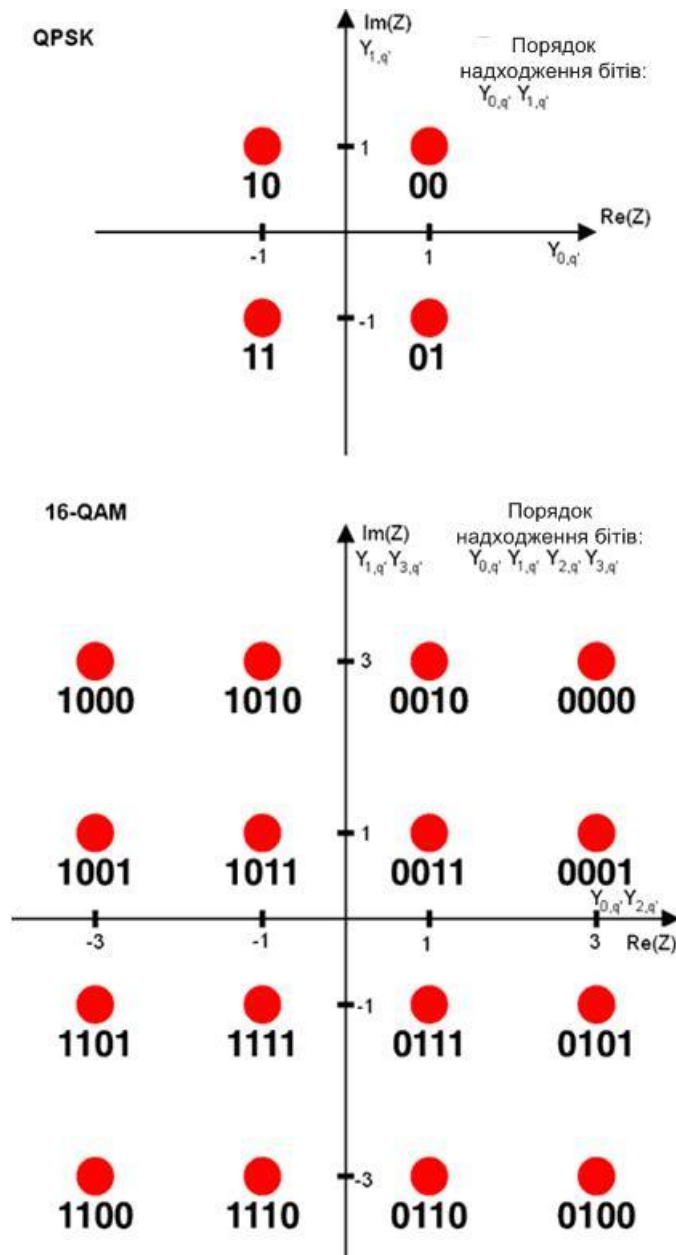
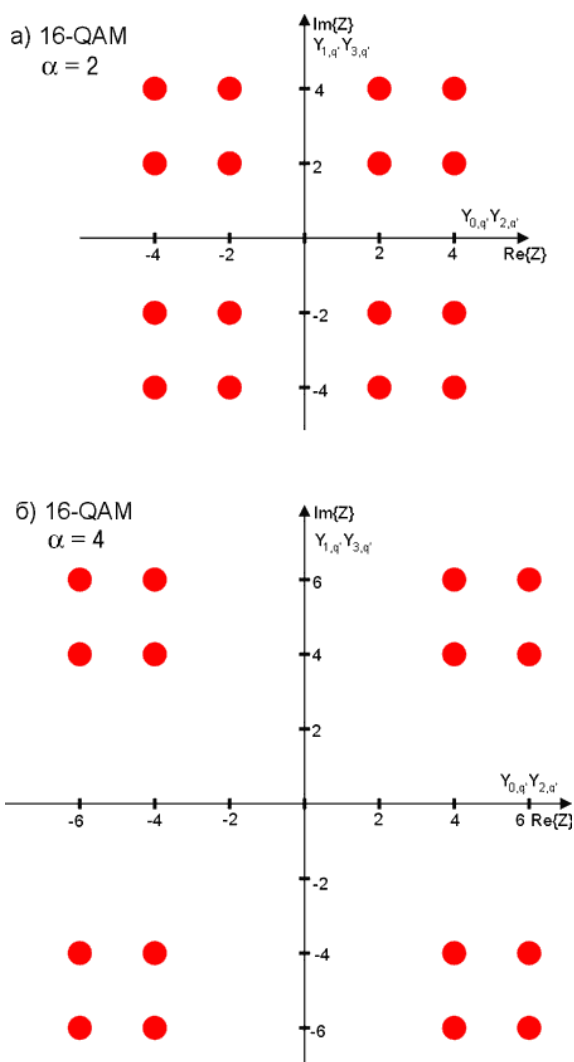


Рисунок 11 – Модуляційні сузір'я для ВФМ-4 (QPSK) та однорідної 64-КАМ (QAM) модуляції

У разі квадратурної амплітудної модуляції змінюється і модуль і аргумент комплексного модуляційного символу  $i$ , відповідно, амплітуда і початкова фаза отриманого у результаті модуляції коливання. Наприклад, у разі однорідної квадратурної модуляції 16-QAM комбінації бітів  $y_{0,q}' = 0, y_{1,q}' = 0, y_{2,q}' = 1, y_{3,q}' = 0$  поставлено у відповідність точку діаграми 0010 і комплексний модуляційний символ  $z = 1 + 3j$  (синфазна косинусоїдальна складова має амплітуду 1, а квадратурна – синусоїдальна – 3), що призводить до утворення в процесі модуляції коливання з амплітудою  $\sqrt{10}$  і початковою фазою  $60^\circ$ . Точку діаграми 0111, в яку відображається комбінація бітів  $y_{0,q}' = 0, y_{1,q}' = 1, y_{2,q}' = 1, y_{3,q}' = 1$ , визначає комплексний модуляційний символ  $z = 1 - j$ , що призводить до утворення в процесі модуляції коливання з амплітудою  $\sqrt{2}$  і початковою фазою  $-45^\circ$ .

Однак у процесі модуляції використовують не самі модуляційні символи  $z$ , а їх нормовані значення «с». Нормування здійснюють для того, щоб усереднена потужність модульованого коливання для всіх кратностей модуляції була б однаковою. Наприклад, для способу *QPSK* нормований комплексний модуляційний символ визначається як  $c = z/\sqrt{2}$ , для однорідної модуляції 16-QAM –  $c = z/\sqrt{10}$ , а для неоднорідної модуляції 64-QAM (з параметром  $\alpha = 4$ ) –  $c = z/\sqrt{108}$ .

### 3. Перемежування і формування модуляційних символів у разі ієрархічного передавання



Описані принципи перемежування і формування модуляційних символів відповідають не ієрархічному способу передавання даних, за якого використовують однорідну квадратурну модуляцію (в цьому випадку відстані між сусідніми точками на векторній діаграмі однакові на всій площині, рис.11).

У разі ієрархічного передавання на вхід пристрою внутрішнього перемежування надходить два потоки даних – вищого пріоритету ( $x'_0, x'_1, x'_2, x'_3, \dots$ ) і нижчого ( $x''_0, x''_1, x''_2, x''_3, \dots$ ). Потік вищого пріоритету завжди демультимплексує на два субпотоки ( $x'_0 - b_{0,0}, x'_1 - b_{1,0}$ ), а потік нижчого пріоритету – на  $(v-2)$  субпотоки ( $x''_0 - b_{2,0}, x''_1 - b_{3,0}$  у випадку 16-QAM й  $x''_0 - b_{2,0}, x''_1 - b_{4,0}, x''_2 - b_{3,0}, x''_3 - b_{5,0}$  у разі 64-QAM).

## Рисунок 12 – Модуляційні сузір'я для неоднорідної модуляції 16-QAM

У разі ієрархічного передавання застосовують неоднорідну квадратурну модуляцію. Особливості ієрархічного передавання (16-QAM) проілюстровано на рис.12. Кожна точка діаграми визначається чотирма бітами, з яких  $y_{0,q}$  і  $y_{1,q}$  є бітами вищого пріоритету, а  $y_{2,q}$ ,  $y_{3,q}$  – нижчого. Як видно, чотири явно виражені групи по чотири точки характеризуються однаковими бітами вищого пріоритету. Координати точок всередині групи визначаються бітами нижчого пріоритету.

Під час неієрархічного декодування демодуляцію здійснюють так, ніби модуляцію було зроблено способом чотирифазної маніпуляції. У такому разі досить визначити лише параметри групи з чотирьох бітів і виділити біти вищого пріоритету  $y_{0,q}$  і  $y_{1,q}$ . Таку процедуру можна реалізувати без помилок за порівняно великого рівня завад, оскільки групи відстоять одна від одної на більшу відстань, ніж окремі точки всередині групи. Якщо рівень завад порівняно невеликий, тоді можна розрізнити положення окремих точок всередині кожної групи й у процесі демодуляції за способом 16-QAM виділити й біти нижчого пріоритету  $y_{2,q}$  і  $y_{3,q}$ .

Розташування точок векторної діаграми залежить від параметра модуляції, який позначають у системі *DVB-T* грецькою літерою  $\alpha$ . Цей параметр дорівнює відношенню відстані між сусідніми точками в двох різних квадрантах до відстані між точками в одному квадраті. Стандарт *DVB-T* передбачає три значення параметра. У разі використання однорідної модуляції параметр  $\alpha = 1$ , у разі неоднорідної:  $\alpha = 2$  або  $\alpha = 4$ .

### 4. Зв'язок між модуляцією OFDM та перетворенням Фур'є

Детальний опис способу модуляції OFDM вимагає високого рівня абстракції. Не випадково в стандарті *DVB-T* наведено формули, що подають вихідний радіосигнал у вигляді дійсної частини комплексного коливання досить складної структури. Подібні формули могли б бути написані, наприклад, і для амплітудно-модульованого коливання, але в такому разі це буде спосіб опису, додатковий до часових, спектральним і векторним діаграм. Інша ситуація у випадку модуляції *OFDM*. Аналітична форма опису є основною, оскільки саме вона визначає спосіб реалізації цього нового виду модуляції.

Розглянемо модуляцію носійних. Незалежно від способу (*QPSK* або *QAM*) модульоване коливання є сумою синфазної компоненти (косинусоїди) з амплітудою, що дорівнює дійсній частині нормованого комплексного модуляційного символу  $Re\{c\} = c_I$ , і квадратурної компоненти з амплітудою, що дорівнює уявній частині модуляційного символу  $Im\{c\} = c_Q$ . Значення модуляційних символів у процесі передавання змінюються відповідно до змісту даних. Таким чином, треба множити опорне синфазне коливання на дійсні частини комплексних символів  $c_I$ , Квадратурні коливання – на уявні частини  $c_Q$ , а результати – скласти. Цю операцію можна виконувати різними способами. Наприклад, можна

всі ці дії виконувати в цифровій формі, а для оброблених даних потім зробити цифро-аналогове перетворення.

Але можна спочатку здійснити цифро-аналогове перетворення дійсної та уявної частин комплексних модуляційних символів, а множення їх на синфазне і квадратурне коливання (а це є не що інше, як амплітудна модуляція) і додавання виконувати в аналоговій формі. З урахуванням того, що для формування випромінюваного сигналу на частоті обраного каналу модуляцію доводиться робити спочатку на проміжній частоті, а потім вдаватися до перетворення частоти, тобто до перенесення спектра сигналу в смугу частот обраного каналу телевізійного мовлення, оптимальною може бути комбінація алгоритмів цифрових і аналогових перетворень сигналів.

Якщо максимальну кількість дій виконати в комплексній формі, тоді сигнал носійної з номером  $k$  і частотою  $f_k$ , модульованої символом  $c_k$ , може бути записано у вигляді дійсної частини добутку комплексного модуляційного символу  $c_k$  та комплексної експоненти, або комплексного коливання з частотою  $f_k$ :

$$s_k(t) = \operatorname{Re}\{c_k \exp(j2\pi f_k t)\} = \operatorname{Re}\{c_k \exp(j2\pi kt/TU)\}. \quad (2)$$

Частота  $f_k$  є  $k$ -тою гармонікою основної частоти  $1/TU$ , тобто величини, зворотної тривалості корисної частини символу ( $TU$ ) і дорівнює відстані між частотами сусідніх носійних. Сигнал OFDM, записаний на інтервалі одного символу, є сумою всіх носійних коливань, модульованих своїми модуляційними символами:

$$s(t) = \sum s_k(t) = \sum \operatorname{Re}\{c_k \exp(j2\pi kt/TU)\}, \quad (3)$$

де додавання слід здійснювати за всіма значеннями  $k$  від  $k_{\min}$  до  $k_{\max}$ .

Але можна спочатку виконати додавання, а потім взяти його дійсну частину. Оскільки цифрова система передавання даних – система з дискретним часом, тоді для обчислень у цифровій формі замість безперервної змінної  $t$  треба підставити її дискретний аналог  $nT$  (тут  $T$  – інтервал дискретизації, а  $n$  – номер відліку):

$$s(nT) = s(n) = \operatorname{Re}\{\sum c_k \exp(j2\pi knT/TU)\}. \quad (4)$$

Порівняймо вираз (4) з формулою зворотного дискретного перетворення Фур'є:

$$X(n) = \sum X_k \exp(j2\pi kn/N). \quad (5)$$

Остання формула також передбачає дії з комплексними числами, вона дозволяє обчислити значення сигналу  $x_n$  в моменти  $nT$  шляхом додавання гармонійних складових з відомими комплексними амплітудами  $X_k$  (тут  $N$  – кількість відліків сигналу і відповідно кількість його складових (разом з постійною складовою), яке може бути розраховане у дискретизованій формі. Зауважимо, що

додавання необхідно здійснювати для всіх  $k$  від 0 до  $(N-1)$ ). Зазначена формула опису сигналу дозволяє перейти з частотної області в часову, зробивши для цього додавання усіх гармонійних складових сигналу, які є ортогональними.

Треба відзначити, що формули (4) і (5) аналогічні, адже радіосигнал OFDM на інтервалі символу також є результатом додавання ортогональних гармонійних коливань із заданими в процесі оброблення і кодування даних амплітудами. Більше того, формули для зворотного перетворення Фур'є і радіосигналу OFDM стають тотожними, якщо припустити  $N = TU/T$  і ввести у формулу для сигналу OFDM додавання від 0 до  $(N-1)$  і вважати нульовими значення модуляційних символів для нововведених додаткових номерів. Тоді стає зрозумілим, що частотне ущільнення з ортогональними носійними є процедурою, що має такий самий математичний опис, що й зворотне дискретне перетворення Фур'є (точніше, його дійсна частина).

Але чи треба здійснювати модуляцію OFDM у вигляді зворотного перетворення Фур'є?

Переваги системи OFDM проявляються у разі використання дуже великої кількості носійних (наприклад, кілька сотен або тисяч), але в цьому випадку традиційне апаратурне формування сигналу OFDM вимагало б величезних схемотехнічних витрат у вигляді тисяч генераторів і модуляторів у передавачі і такого ж числа детекторів в приймачі. Малоімовірно, що таку схему було б реалізовано.

Для прямого і зворотного дискретного перетворення Фур'є в останні десятиліття розроблено швидкі й ефективні алгоритми, їх так і називають – алгоритми швидкого перетворення Фур'є (ШПФ і ЗШПФ), і створені процесори ШПФ у вигляді великих інтегральних схем. Формула для сигналу OFDM, якою описують дійсну частину зворотного перетворення Фур'є і регламентує формування радіосигналу, є важливою частиною стандарту DVB-T, оскільки саме вона визначає алгоритм практичної реалізації запропонованого в стандарті способу модуляції OFDM.

Відношення  $TU/N = T$  (тут  $N$  – розмір масиву ШПФ), що визначає інтервал дискретизації у формулі (4), відіграє важливу роль у специфікації стандарту DVB-T. Величина  $1/T$  називається системною тактовою частотою. Тривалість символу OFDM, і захисний інтервал є цілими кратними  $T$ . У системі DVB-T, розрахованій на канали завширшки 8 МГц, системна тактова частота дорівнює  $1/T = 64/7$  МГц. Ця величина є оптимальною для зменшення інтерференційних завад через взаємодію з випромінюваними радіосигналами аналогового телебачення.

Систему DVB-T було спочатку спроектовано для кроку частот каналів 8 МГц, прийнятого в Європі для дециметрового частотного діапазону. Однак систему може бути легко пристосовано до діапазонів з іншим кроком частотних каналів. Для переходу до 7 МГц каналів необхідно замінити системну тактову частоту на 8 МГц. У такому разі зберігається вся структура оброблення сигналів (можна використовувати одні й ті ж інтегральні схеми для оброблення), але обсяг переданих даних становить лише 7/8 від початкового. Для переходу до ка-

налу шириною 6 МГц слід використовувати системну тактову частоту  $(13,5 \cdot 8192) / (858 \cdot 19)$  МГц.

Можна використовувати не тільки дійсну, а й уявну частини обчисленого зворотного перетворення Фур'є. Виконаємо відповідно до формули зворотного перетворення Фур'є обчислення дійсної і уявної частин (уявну частину позначимо  $\Sigma Q(t)$ , дійсну – позначимо  $\Sigma I(t)$ ). У результаті отримуємо вже описаний раніше сигнал  $s(t)$ :

$$\Sigma c_k \cdot \exp(j2\pi f_k t) = \Sigma I(t) + j\Sigma Q(t). \quad (6)$$

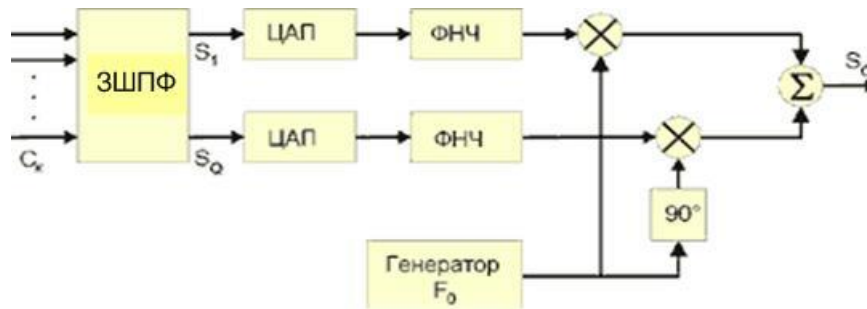


Рисунок 13 – Схема формування радіосигналу OFDM

Помножимо дійсну частину  $S_I$  на коливання з частотою  $F_0$  (будемо називати його "синфазним"), а уявну частину  $S_Q$  – на квадратурне коливання тієї ж частоти (фазу зміщено відносно синфазного на  $90^\circ$ ). Тоді додавання отриманих добутків дає сигнал *OFDM*, спектр якого зміщений на частоту  $F_0$  відносно проміжної частоти.

Така операція забезпечує перетворення частоти, яке неминуче використовують для перенесення радіосигналу в смугу частот обраного каналу телевізійного мовлення:

$$s_0(t) = \Sigma I(t) \cdot \cos(2\pi F_0 t) - \Sigma Q(t) \cdot \sin(2\pi F_0 t) = \Sigma \{ \Sigma I_k(t) \cdot \cos[2\pi (f_k + F_0) t] - \Sigma Q_k(t) \cdot \sin[2\pi (f_k + F_0) t] \}. \quad (7)$$

Саме таке перетворення ілюструє схема формування радіосигналу *OFDM* (рис. 13).

Загальну спектральну густину потужності сигналу *OFDM* може бути знайдено як суму спектральних густин потужності окремих носійних (рис. 14). Густина потужності могла б бути досить близькою до постійної величини в смузі частот, де розташовано носійні, але тривалість переданого *OFDM* символу більше, ніж величина, обернена величині проміжку між носійними, на величину захисного інтервалу.



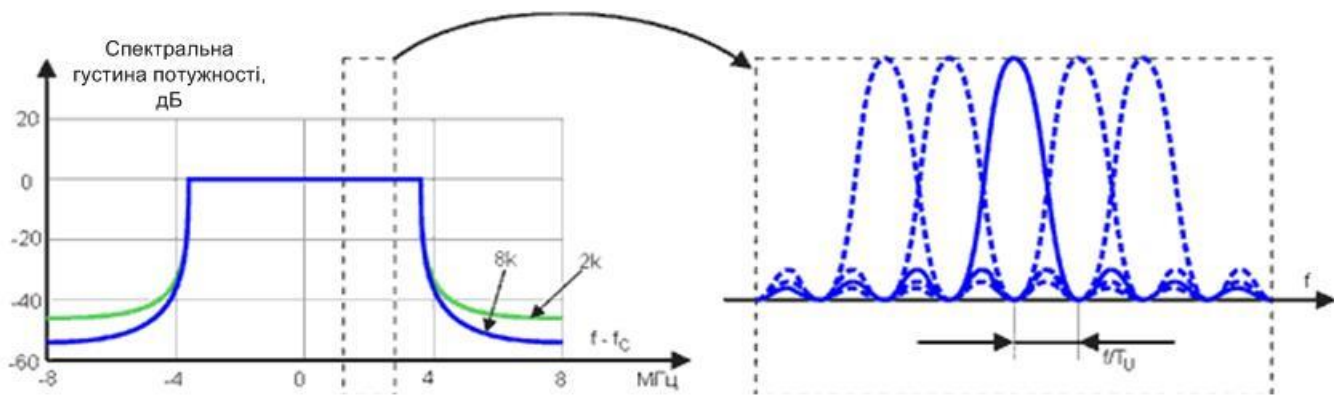


Рисунок 14 – Спектр потужності радіосигналу *OFDM* (захисний інтервал  $T_U/4$ ,  $f_c$  – центральна частота)

У зв'язку з цим, основна пелюстка спектральної густини потужності однієї носійної дещо менше подвоєної відстані між носійними, тому спектральна щільність потужності сигналу *OFDM* в номінальній смузі частот (7,608258 МГц у режимі 2k і 7,611607 МГц у режимі 8k) не є постійною величиною. Рівень потужності на частотах поза номінальною смугою може бути зменшено за допомогою відповідних фільтрів.

## 5. Особливості багатопроменевого приймання *OFDM* сигналу

Багатопроменеве приймання – явище, типове для наземного телевізійного мовлення. Якщо, крім основного радіосигналу, приймають, наприклад, сигнал, відбитий від якої-небудь перешкоди, що надійшов до приймальної антени із затримкою, на екрані з'являється повтор, тобто копія зображення, зміщена по горизонталі. Якщо інтенсивність повтору велика (відбитий сигнал має амплітуду сумірну з основним), тоді зображення стає неприйнятним. Боротися з повторами можна, наприклад, шляхом використання вузькоспрямованих приймальних антен.

Можливий і частотний підхід до оцінювання багатопроменевого приймання. У результаті інтерференції радіосигналів, що прийшли в точку приймання з різними затримками, деякі частотні компоненти радіосигналу послаблюються, а деякі – посилюються, що призводить до нерівномірності частотної характеристики каналу (рис. 15). Частотну характеристику за допомогою перебудови фільтрів можна спробувати зробити постійною в частотному діапазоні радіосигналу, якщо попередньо оцінити нерівномірність. Але такий шлях не завжди можливий. Уявімо, що повторний радіосигнал приходить в точку приймання з такою ж інтенсивністю, що й основний (такий повтор називають сигналом відлуння  $0$  дБ). Інтерференційна взаємодія основного сигналу і повтору призведе до того, що окремі компоненти сумарного сигналу виявляться повністю знищеними.

Сигнал відлуння, затриманий на чверть тривалості символу, призводить до заглушення кожної четвертої носійної сигналу *OFDM* (рис. 15). Такі заглу-

шені компоненти не може бути скориговано методами смугової фільтрації, прийнятий сигнал зазнає незворотних спотворень.

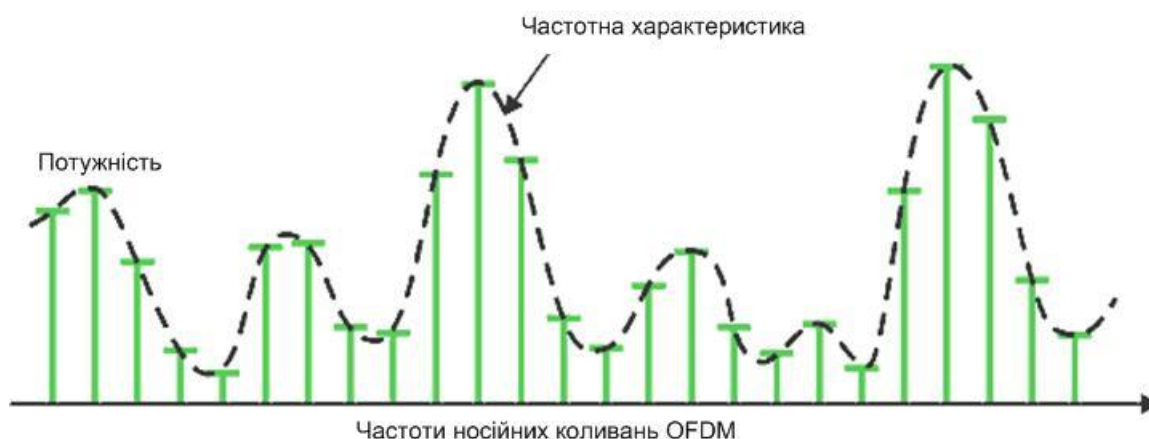


Рисунок 15 – Приклад фрагменту обвідної спектру OFDM сигналу, спотвореного інтенсивним сигналом відлуння

Проте в системі COFDM інформацію, яку переносять частково заглушені частотні компоненти, може бути повністю відновлено завдяки використанню частотного ущільнення в поєднанні із завадостійким кодуванням. Це є наслідком того, що кожна носійна символу OFDM несе лише невелику частину даних, помилки в яких може бути виявлено та виправлено за допомогою надлишкової інформації обумовленої системою каналного кодування.

Якщо сигнал відлуння, рівень якого 0 дБ, має затримку меншу ніж 1/4 від величини корисного інтервалу, тоді провали в частотній характеристиці будуть мати місце рідше, але спотвореними буде відразу більша кількість носійних. У такому разі допомагає внутрішнє перемежування, що є, по суті, частотним перемежуванням, у процесі якого здійснюють перестановку даних, що переносять носійні коливання різної частоти.

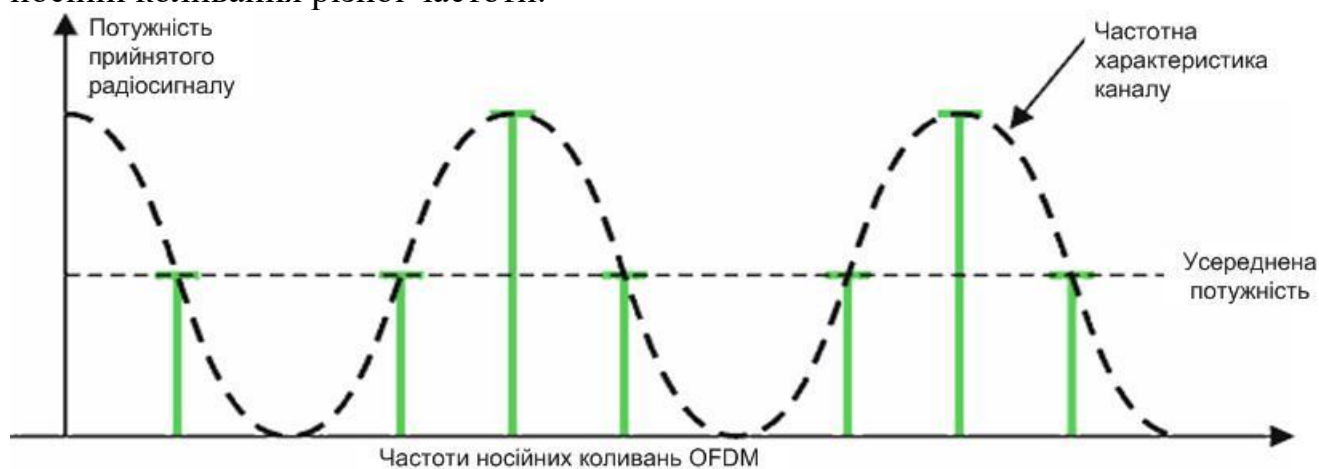


Рисунок.16 – Фрагмент спектру сигналу OFDM, спотвореного сигналом відлуння з рівнем 0 дБ

Таким чином, внутрішнє кодування і перемежування запобігають появі пакетів помилкових бітів і таким чином зменшують частоту появи помилок у прийнятому потоці даних до прийнятної величини. Завершує процес боротьби з помилками зовнішнє кодування і перемежування, які виправляють як бітові помилки, так і помилкові байти, тобто вони ефективні в боротьбі з великими пакетними помилками.

## **6. Форматування даних та структура радіосигналів системи DVB-T**

Сигнал, отриманий в результаті модуляції з частотним ущільненням, складається з багатьох модульованих носійних частот розташованих з певним кроком у межах виділеної частотної смуги. Кожна носійна передає протягом часу існування символу OFDM кілька бітів інформації.

Кількість бітів, перенесених однією носійною за час передавання символу OFDM, залежить від способу модуляції, застосованого для окремої носійної. У разі чотирифазної маніпуляції (ВФМЗ-4, QPSK) – 2 біти, у разі 16-QAM – 4 біти, у разі 64-QAM – 6 бітів.

Радіочастотні сигнали цифрового телебачення мають кадрову структуру і передають інформацію програмного контенту та службову інформацію для керування процесом детектування сигнального потоку (рис. 17). Кожен кадр складається з 68 символів OFDM, нумерованих від 0 до 67. Чотири послідовних кадри утворюють суперкадр. За обраної структури кадру в одному суперкадрі завжди міститься ціле число інформаційних пакетів довжиною 204 байти (рандомізованих транспортних пакетів MPEG-2, що містять для захисту від помилок перевірочні байти коду Ріда-Соломона).

Кожен символ тривалістю TS утворено шляхом модуляції 1705 носійних в режимі 2k або 6817 носійних у режимі 8k. На рис.18 умовно наведено одну модульовану носійну частоту із множини частот, що утворюють символ OFDM.

Інтервал TS має дві складові: корисний інтервал TU, під час якого приймач здійснює детектування символу OFDM, тобто виділяє корисну інформацію, і захисного інтервалу TG. Захисний інтервал є інтервалом часу, протягом якого приймач не здійснює аналіз сигналу, що надходить на його антену, оскільки протягом цього інтервалу може мати місце міжсимвольна інтерференція. Тривалість корисного інтервалу і корисного інтервалу дорівнює цілому числу періодів кожної носійної, що є у складі символу OFDM. Амплітуда та початкова фаза кожного модульованого коливання залежить від значень інформаційних бітів, які вона передає.

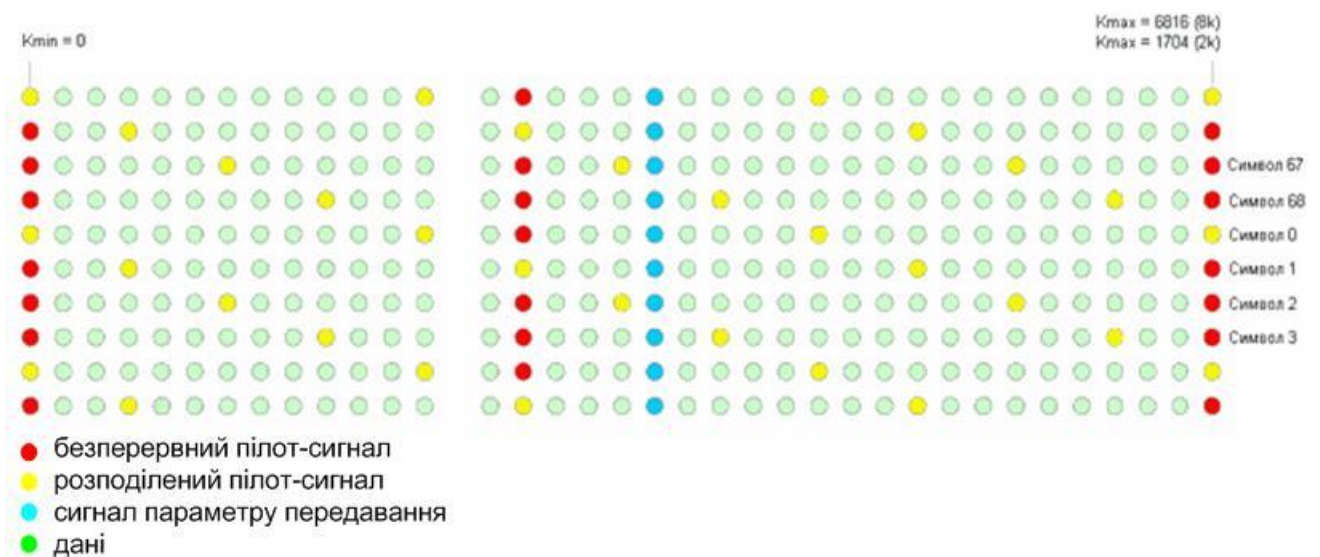


Рисунок 17 – Структура кадру DVB-T

Окрім даних, пов'язаних з контентом телевізійного сигналу, в кадрі OFDM передають додаткові опорні сигнали, структура яких наперед відома, та інформаційні сигнали про параметри передавання. Опорні сигнали використовують у приймачі для корекції АЧХ радіочастотного тракту та налаштування схем детектування вхідного сигналу.

Опорні сигнали, які ще називають "пілот-сигналами" (іншими словами – сигнали керування), використовують насамперед для синхронізації. Їх розподілено в часі і в частотному спектрі сигналу OFDM за певною схемою, інформація про їх амплітуди і фази відома, тому їх використовують для визначення параметрів каналу передавання радіосигналу. Приймач налаштовується на приймання опорних сигналів протягом невеликого інтервалу часу після ввімкнення живлення.

У системі використовують два типи пілот-сигналів: безперервні та розподілені.

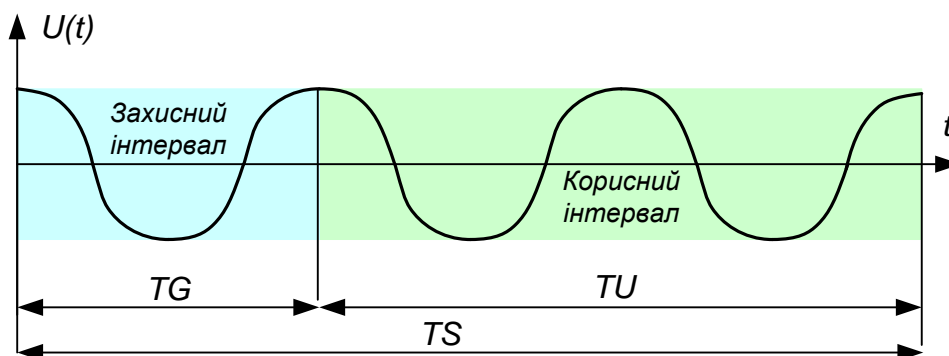


Рисунок 18 – Структура часового інтервалу для передавання одного символу OFDM

Безперервні пілот-сигнали передають на постійних частотах в кожному символі OFDM, розподілені – розподілено рівномірно в часі і в частотному діапазоні.

Безперервні сигнали використовують для синхронізації та оцінювання фазових шумів каналу, розподілені – для оцінювання характеристик каналу, щоб здійснювати часову та частотну інтерполяцію. Використання часової інтерполяції в проміжках між розподіленими пілот-сигналами у разі достатньої потужності сигналу може поліпшити приймання сигналу приймачами, встановленими на рухомих об'єктах, наприклад, на поїздах та автомобілях.

Сигнали параметрів режиму передавання використовують для повідомлення приймачу параметрів системи, які застосовано до каналного кодування і модуляції: спосіб передавання – ієрархічний або неієрархічний, параметри модуляції, величина захисного інтервалу, швидкість внутрішнього коду, режим передавання – 2k або 8k, номер кадру в суперкадрі. Ці відомості використовують у приймачі для швидкого налаштування. Сигнали параметрів передають на 68 послідовних символах OFDM, що позначають як кадр OFDM.

Кожен символ OFDM переносить один біт, що належить до сигналів параметрів передавання. Блок даних, відповідний одному кадру OFDM, містить 68 бітів, призначення яких встановлено так:

- 1 біт - ініціалізація;
- 16 бітів - синхронізація;
- 37 бітів - сигнальна інформація;
- 14 бітів - перевіірочні біти для виявлення та виправлення помилок, що виникають в каналі зв'язку.

З 37 інформаційних бітів зараз використовується 23, решта 14 є резервом на майбутнє. Перевіірочні біти обчислюють відповідно до правил систематичного кодування Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема. Завадозахищеності даних, які переносять сигнали параметрів передавання, сприяє і спосіб модуляції. Кожну носійну, що переносить сигнали параметрів передавання, модулюють способом диференціальної двійкової фазової маніпуляції (DBPSK - Differential Binary Phase Shift Keying), відповідно до якої фаза носійної змінюється на протилежну від символу до символу, якщо передані дані дорівнюють одиниці, і не змінюється, якщо передані дані дорівнюють нулю.

Природним є питання, чому використовують лише 1705 і 6817 носійних, хоча перетворювач Фур'є у модуляторі OFDM допускає 2048 і 8192 носійних? Число носійних, що переносять дані, пілот-сигнали і сигнали параметрів передавання, встановлено згідно таких вимог:

- спільна структура кадру для режимів 2k і 8k;
- достатня величина захисного частотного інтервалу між двома сусідніми блоками носійних частот;
- максимальна пропускна здатність каналу;
- достатня кількість пілот-сигналів для отримання інформації про канал передавання;
- однакове число носійних, що переносять корисні дані, в кожному символі OFDM;
- ціле число MPEG-2 транспортних пакетів, які передають одним суперкадром, незалежно від режиму передавання.

## Параметри системи DVB-T

Основні параметри, що характеризують передавання даних у системі DVB-T, наведено у табл. 1 (числа, наведені курсивом, є приблизними величинами). Кількість носійних, що передають корисну інформацію, залежить тільки від режиму і дорівнює 1512 для режиму 2k та 6048 – для режиму 8k. Число "корисних" носійних в обох режимах відрізняється рівно в чотири рази. Якщо врахувати, що і тривалість корисного інтервалу у разі переходу від режиму до режиму також змінюється в чотири рази, то такий важливий параметр, як частота проходження символів даних  $RS$ , виявляється в двох режимах однаковою і дорівнює 6,75 мільйонам символів в секунду ( $RS = 1512 / 224\text{мкс} = 6048 / 896\text{мкс} = 6,75\text{МГц} = 6,75\text{Мега символ / с}$ ).

Величину  $RS$  можна використати для розрахунку швидкості передавання даних у різних режимах і за різних комбінацій параметрів системи DVB-T:  $RSU = RS \cdot b \cdot CRI \cdot CRRS \cdot (TU / TS)$  (де  $b$  – кількість бітів, переданих в одному символі за допомогою однієї носійної,  $CRI$  - швидкість внутрішнього згорткового коду;  $CRRS$  – швидкість зовнішнього коду Ріда-Соломона, що дорівнює 188/204;  $(TU/TS)$  – відношення тривалості корисного інтервалу до загальної тривалості символу. Результати такого підрахунку швидкості передавання корисних даних наведено в табл. 2 .

У табл. 2 наведено також розрахункові значення відношення сигнал/шум для радіочастотного сигналу ( $C/N$ ) на вході приймача для каналу зв'язку з гаусовим шумом за ієрархічного передавання (у разі інших характеристик шуму каналу необхідні для приймання значення  $C/N$  будуть іншими). Цей показник є пороговим. Якщо відношення сигнал/шум вище наведеної в таблиці величини, тоді внутрішній декодер здатний довести частоту помилок до величини, меншу за  $2 \cdot 10^{-4}$ , а зовнішній – до  $10^{-11}$ . За таких показників на вході демультимплексора MPEG-2 в приймачі буде виникати одна не скоригована помилка за годину роботи.

Як впливає з табл. 2, в системі DVB-T швидкість передавання корисних даних може бути змінено в значних межах: від 4,98 до 31,67 Мбіт/с (це перекриває весь діапазон потреб, як телебачення обмеженої чіткості, так і телебаченням високої чіткості).

Таблиця 1 – Основні параметри системи DVB-T

Параметр	Режим	
	8k	2k
Число носійних коливань в символі OFDM	6817	1705
Тривалість корисного інтервалу $T_u$ , мкс	896	224
Тривалість захисного інтервалу $T_g$ , мкс	224, 112, 56, 28	56, 28, 14, 7
Інтервал між носійними частотами, Гц	1116	4464
Інтервал між крайніми частотами, МГц	7,61	7,61
Різновид модуляції носійних частот	QPSK, 16-QAM,	QPSK, 16-QAM,

	64-QAM	64-QAM
Швидкість внутрішнього коду	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8

Найменше значення швидкості 4,98 Мбіт/с, що має місце у разі модуляції носійних способом QPSK і швидкості внутрішнього коду 1/2, забезпечує найвищу завадозахищеність системи передавання телевізійного сигналу. Для практично безпомилкової роботи достатньо відношення сигнал/шум у гаусовому каналі всього 3,1 дБ. Але для досягнення швидкості 31,67 Мбіт/с (модуляція носійних 64-QAM і швидкість внутрішнього коду 7/8) має бути забезпечено відношення сигнал/шум не менше 20,1 дБ.

Таблиця 2 – Швидкість передавання даних системою DVB-T

Модуляція	CR1	C/N, дБ (гаусів канал)	Швидкість передавання даних, Мбіт/с			
			Tg/Tu=1/ 4	Tg/Tu=1/ 8	Tg/Tu=1/ 16	Tg/Tu=1/ 32
QPSK	1/2	3,1	4,98	5,53	5,85	6,03
QPSK	2/3	4,9	6,64	7,37	7,81	8,04
QPSK	3/4	5,9	7,46	8,29	8,78	9,05
QPSK	5/6	6,9	8,29	9,22	9,76	10,05
QPSK	7/8	7,7	8,71	9,68	10,25	10,56
16-QAM	1/2	8,8	9,95	11,06	11,71	12,06
16-QAM	2/3	11,1	13,27	14,75	15,61	16,09
16-QAM	3/4	12,5	14,93	16,59	17,56	18,10
16-QAM	5/6	13,5	16,59	18,43	19,52	20,11
16-QAM	7/8	13,9	17,42	19,35	20,49	21,11
64-QAM	1/2	14,4	19,91	22,12	23,42	24,13
64-QAM	2/3	16,5	19,91	22,12	23,42	24,13
64-QAM	3/4	18,0	22,39	24,88	26,35	27,14
64-QAM	5/6	19,3	24,88	27,65	29,27	30,16
64-QAM	7/8	20,1	26,13	29,03	30,74	31,67

Інформацію наведену в табл. 2 можна використовувати також для визначення швидкості передавання даних в режимі ієрархічної модуляції. Швидкість для потоку з вищим пріоритетом відповідає модуляції носійних способом QPSK. У разі модуляції носійних 16-QAM швидкість передавання даних для потоку з нижчим пріоритетом знаходиться в клітинках таблиці, де наведено дані для QPSK, а у разі модуляції 64-QAM – для 16-QAM.

Таблиці 1 і 2 підтверджують надзвичайну гнучкість системи DVB-T. Надаючи широкий спектр засобів, система здатна з високою надійністю передавати цифрові дані, що несуть інформацію про сигнал телебачення.

## Лекція 4

### **ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ DVB-T2**

*Навчальні питання:*

1. *Передумови створення системи DVB-T2*
2. *Принципи організації системи DVB-T2*
3. *Особливості модуляції сигналів у системі DVB-T2*
4. *Розподілені пілот-сигнали*
5. *Диференційована завадостійкість окремих послуг і структура кадру T2*
6. *Багатоканальне приймання сигналів DVB-T2*
7. *Додаткові функції і перспективи збільшення функціональності*

#### **1. Передумови створення системи DVB-T2**

У лютому 2006 року в рамках консорціуму DVB був створений дослідницький комітет (Study Mission), який повинен був оцінити потенціал різних технологій. Через півроку роботу комітету було закінчено, і DVB консорціум почав розробляти стандарт DVB-T2.

Спочатку консорціум визначив набір комерційних вимог, що визначають межі даного проекту:

- Можливість приймати трансляції T2 на існуючі домашні антени, і перехід на новий стандарт не повинен вимагати зміни інфраструктури передавальної системи. Ця вимога не дозволила реалізувати у стандарті технологію MIMO, для якої необхідно було б використовувати нові приймальні та передавальні антени.

- T2 має бути орієнтовано для передавання на фіксовані та портативні антени.

- T2 має забезпечити, як мінімум, 30%-вий приріст пропускної спроможності каналів щодо DVB-T за однакових умов передавання.

- T2 має поліпшити роботу одночастотних мереж (SFN).

- У системі DVB-T2 слід передбачити можливість співіснування в одному РЧ-каналі послуг, що передають з різним ступенем завадостійкості. Наприклад, частина послуг, трансльованих в одному каналі шириною 8 МГц, може бути призначена для приймання на спрямовані антени, встановлені на дахах, а частина – для приймання на кімнатні портативні антени.

- У системі DVB-T2 слід забезпечити більшу гнучкість використання частотної смуги.

- У системі DVB-T2 необхідно забезпечити механізм, що дозволяє зменшити відношення пікової та середньої потужності радіосигналу. Це дозволить знизити експлуатаційні витрати.

На той час можливість впровадження ТВЧ в ефірні мережі розглядали відразу кілька країн. У Великобританії був особливо гострий дефіцит спектра для



ТВЧ з урахуванням того, що весь спектр, який мав звільнитись після завершення аналогових мовлення, вже було заплановано для передавання трансляцій зі стандартною роздільною здатністю. Один канал було заплановано для мультиплексу ТВЧ формату. Щоб максимально його завантажити, треба максимально ефективно використовувати транспортний ресурс каналу. У зв'язку з цим було заплановано застосувати мультиплекс у форматі DVB-T2, який забезпечує, як мінімум, 30% -вий збільшення пропускної здатності.

Стандарт DVB-T2 остаточно прийнято у червні 2010 року. Передбачалось, що на початку 2011 року буде розроблено комплект мікросхем VLSI для реалізації приймачів DVB-T2.

## 2. Принципи організації системи DVB-T2

Основний принцип розроблення стандартів родини DVB полягає в тому, що вони мають бути максимально сумісні між собою. Тобто, перетворення сигналу у разі його переформатування (наприклад, з DVB-S2 в DVB-T2) має бути максимально простим. Відповідно, під час розроблення нових стандартів, необхідно використовувати ті ж механізми, що й в наявних стандартах. Тому, для стандарту T2 було запозичено дві ключові технології у стандарті DVB-S2, це:

1. Системна архітектура транспортних потоків, в першу чергу, інкапсуляція даних в низькочастотні Base Band (BB) пакети.

2. Використання завадозахисного коду з малою щільністю перевірок на парність Low Density Parity Check Codes – LDPC. Значна частина рішень, реалізована під час розроблення T2, була спрямована на максимальне збільшення пропускної здатності каналів. Ряд параметрів – нові розмірності швидкого перетворення Фур'є (ФТТ) і захисних інтервалів, а також нові режими введення пілот-сигналів, було введено для можливості оптимізації параметрів мережі залежно від характеристик конкретного каналу.

### Специфікація DVB-T2.

#### Схеми завадостійкого кодування (FEC) і Base Band (BB) кадри

Для передавання цифрового сигнального потоку його поділяють на блоки певної величини з яких формують низькочастотні (НЧ) кадри (англійською **Base Band (BB) frames**). Корисні дані кожного кадру кодують завадостійким кодом LDPC, аналогічним тому, який застосовують у системі DVB-S2. Для усунення помилок, що залишилися після LDPC-декодування, дані додатково захищають коротким кодом Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема (Bose-Chaudhuri-Nocquenghem) BCH.

Повна довжина низькочастотного кадру після здійснення завадостійкого кодування становить 64800 бітів. Цей кадр є базовим блоком системи T2. Частка контрольних бітів завадостійкого кодування, що передбачено стандартом T2 може коливатись від 15 до 50%.

Передбачено можливість використовувати більш короткий варіант кодованого кадру, що має величину 16200 бітів. Такий формат кадру може бути за-

стосовано для зменшення затримок у разі приймання сигналів низькошвидкісних послуг.



Рисунок 1 – Структура інформаційного кадру після завадостійкого кодування

Дані всередині НЧ-кадру передають, як правило, у вигляді послідовності транспортних пакетів MPEG-2. У той же час, поля сигналізації в заголовку НЧ-кадру повністю сумісні з системою інкапсуляції IP-пакетів згідно нового DVB-протоколу під назвою Generic Stream Encapsulation.

Дослідження завадозахищеності сигнального потоку кодованого кодом LDPC забезпечує істотне підвищення захищеності порівняно з захистом, використаним у системі DVB-T, тобто кодуванням загортковим кодом у поєднанні з кодом Ріда-Соломона. Виграш щодо порогового рівня сигнал/шум (C/N) за рахунок нового кодування може становити до 3 дБ для типового рівня помилок у разі використання однакової частки контрольних символів. Це поліпшення характеристик системи дозволяє підвищити пропускну здатність каналу приблизно на 30% (наприклад, за рахунок застосування більшої кратності модуляції).

### 3. Особливості модуляції сигналів у системі DVB-T2

Під час розроблення специфікації T2 зробили порівняльне дослідження кількох варіантів одно частотної та багато частотної модуляції. Остаточо було обрано варіант OFDM з захисними інтервалами (GI-OFDM), рис. 2, який використовують у специфікації стандарту DVB-T.

У GI-OFDM кожен символ передають за допомогою великої кількості ортогональних носійних, модульованих одночасно по фазі і амплітуді. Зокрема, у системі DVB-T передбачено два режими – 2К і 8К. Ці цифри відображають розмірність швидкого перетворення Фур'є (FFT), яке використовують для реалізації багаточастотної модуляції. Фактична кількість носійних, що використовують для передавання даних, як ми знаємо, дещо менше.



Рисунок 2 – Захисні інтервали в структурі OFDM сигналу

Довжину захисного інтервалу вибирають залежно від розрахункової протяжності ефірного тракту та інших параметрів телевізійної мережі. Довші захисні інтервали потрібні в одночастотних мережах, де сигнали від сусідніх передавачів можуть надходити на приймач із значним запізненням відносно основного сигналу.

Захисний інтервал є складовою процесу передавання, що призводить до зменшення пропускної здатності транспортного ресурсу. У системі DVB-T цей інтервал може зменшувати пропускну здатність до 1/4 максимальної теоретичної пропускної здатності системи. З метою забезпечити захисний інтервал достатньої величини з одного боку та збільшити пропускну здатність – з іншого, у системі T2 введено два нові режими – 16К й 32К, з відповідним збільшенням числа ортогональних носійних. Виграш стосовно пропускної здатності у результаті застосування режиму 32К проілюстровано на рис.3.

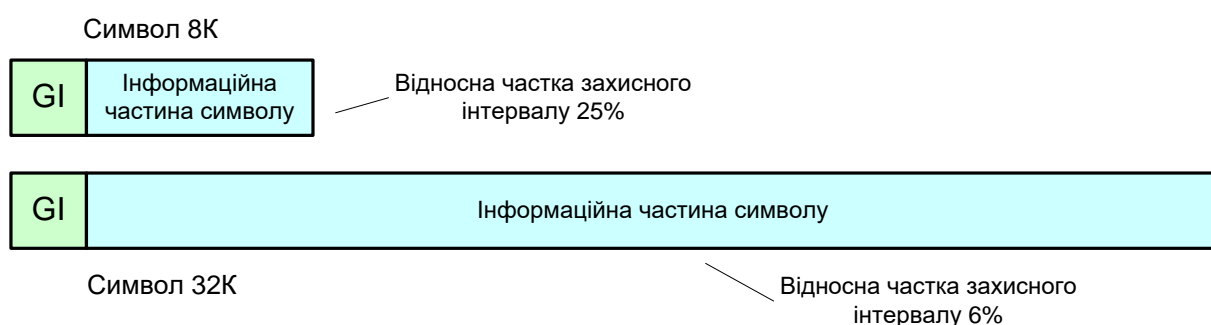


Рисунок 3 – Ілюстрація зміни відносної величини захисного інтервалу в системі DVB-T2

Максимальна тривалість захисного інтервалу в T2 має місце в режимі 32К. Співвідношення тривалості захисного інтервалу й загальної тривалості інтервалу передавання символу OFDM в цьому випадку складає 19/128, а тривалість GI перевищує 500 мкс, чого цілком достатньо для будівництва великої загальнодержавної одночастотної мережі.

У специфікації T2 запропоновано більшу кількість режимів OFDM та тривалості захисних інтервалів, а саме:

- розмірності швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) – 1К, 2К, 4К, 8К, 16К, 32К;
- відносна тривалість захисних інтервалів – 1/128, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128, 1/4.

Як відомо в OFDM кожен носійну модулюють методами багатократної модуляції (ФМ, КАМ). Найбільша кратність модуляції, яку застосовано у системі DVB-T становить 64 (QAM-64), забезпечує передавання 6 бітів однією носійною під час передавання одного символу OFDM.

У специфікації T2 найбільшу кратність модуляції збільшено до 256 (QAM-256), вона дозволяє передавати однією носійною 8 бітів.

Обвідна спектру модульованих коливань T2 у режимах 16K і 32K має значно більш крутий спад позасмугових складових порівняно з режимом 2K, рис. 4. Ця обставина дозволяє розмішувати носійні ближче до меж стандартної спектральної маски, яку стандартизовано для сигналів DVB-T у смузі частот 8 МГц. Таке розширення смуги дозволяє збільшити пропускну здатність додатково на 2%.

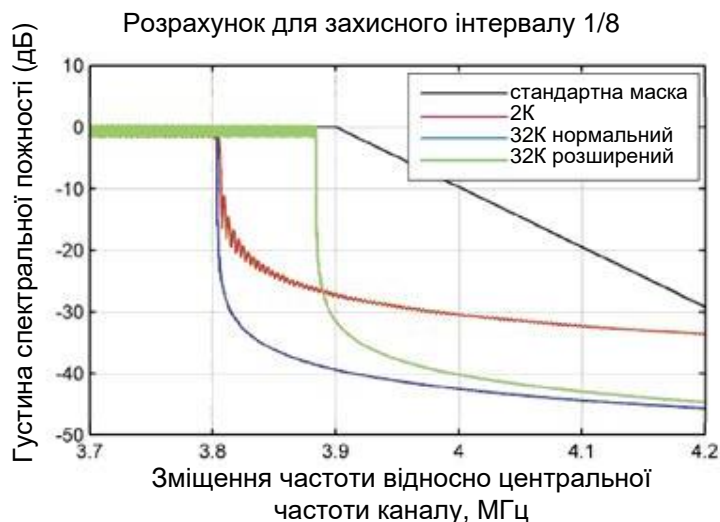


Рисунок 4 – Теоретично визначені обвідні спектру сигналів DVB-T2 для каналу 8 МГц

#### 4. Розподілені пілот-сигнали

У системах OFDM використовують розподілені пілот-сигнали. Ці службові сигнали є спеціальним чином модульованими елементами, які певним чином рознесені в часі й між носійними частотами. Дані про пілот-сигнали та їх параметри закладено у систему керування кожного приймача OFDM сигналів для забезпечення можливості оцінювання стану каналу.

У системі DVB-T кожен дванадцятий модульований елемент є пілот-сигналом, тобто для їх передавання використовують 8% від загального частотного ресурсу. Цю пропорцію застосовують за будь-яких варіантів захисних інтервалів, і розміщення пілот-сигналів має бути таким, щоб засобами приймача можна було вирівняти передавальну характеристику каналу у режимі із захисним інтервалом 1/4. Однак для менших захисних інтервалів наявність пілот-сигналів в кількості 8% є надлишковою. Тому, в системі T2 передбачено вісім різних варіантів розміщення пілот-сигналів. Кожному варіанту відносної тривалості захисного інтервалу відповідає кілька можливих варіантів розміщення пілот-сигналів. Вибір цих варіантів відбувається динамічно (адаптація до характеристики каналу) залежно від поточного стану каналу, що дозволяє оптимізувати їх кількість. На рис. 5 наведено два можливі варіанти розміщення.

Більш щільне розміщення пілот-сигналів використовують для зменшення порогового рівня C/N на вході приймача або для поліпшення синхронізації.

В останньому випадку пілот-сигнали модулюють псевдовипадковою послідовністю.

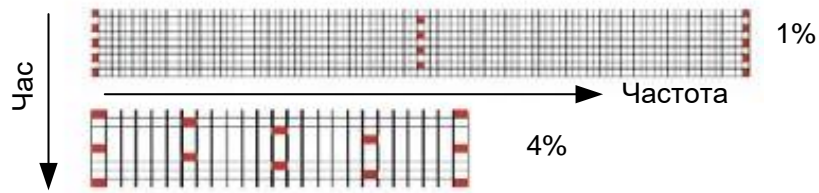


Рисунок 5 – Типові схеми розміщення пілот-сигналів та частка виділених для них ресурсів

## 5. Диференційована завадостійкість окремих послуг і структура кадру T2

Комерційне використання системи T2 обумовило необхідність забезпечити різні рівні завадостійкості для різних послуг. Такі можливості можна забезпечити використанням різних схем модуляції і ступеня завадостійкого кодування. У системі T2 зазначену вище можливість забезпечують шляхом групування OFDM-символів всередині кадру, так що сигнальний потік кожної послуги передають цільним блоком, який розміщено в кадрі у певному сегменті (слоті). Цей принцип проілюстровано на рис. 6

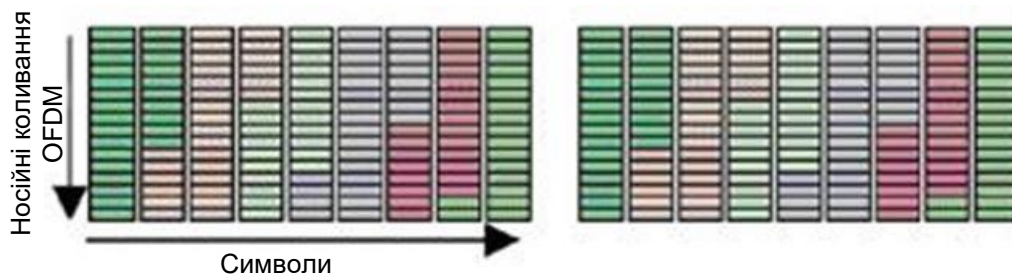


Рисунок 6 – Структура кадрів T2. Фрагменти потоків різних послуг позначено різними кольорами

Початок кожного кадру T2 ініціюють коротким OFDM-символом P1. Цей символ OFDM має розмірність 1К. Структура символу містить повтори початку і кінця символу на сусідніх носійних (тобто із зсувом по частоті), як це наведено на рис. 7. Така структура символу P1 з одного боку дозволяє легко його виявити, а з іншого – унеможливорює імітацію цього символу яким-небудь фрагментом основного кадру.

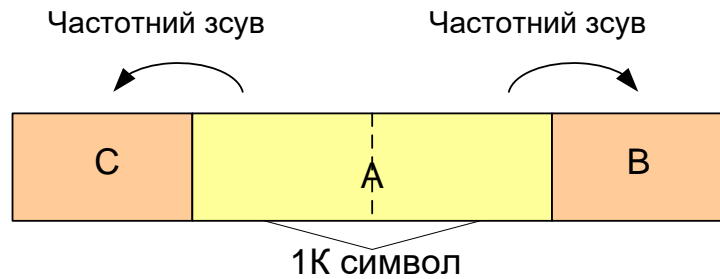


Рисунок 7 – Узагальнена структура символу P1 сигналізації DVB-T2

Символ P1 забезпечує простий і надійний механізм виявлення трансляції T2-приймачем, що здійснює перегляд спектру (сканує) в режимі пошуку, а також швидке захоплення приймачем частоти і 6-бітної сигналізації (наприклад, для визначення розмірності ШПФ в кадрі T2).

Стандартна тривалість кадру T2 - близько 200 мс, а надбудова, яка потрібна для передавання інформації про структуру кадру, як правило, потребує менше 1%.

### Перемежування

У системі T2 застосовано трикаскадне перемежування. Такий спосіб перемежування практично гарантує, що спотворені елементи, у тому числі за наявності пакетних помилок, після відновлення природної послідовності (зворотного перемежування) у декодері будуть розкидані вздовж LDPC кодованому кадру. Це надає можливість відтворити спотворені біти у процесі декодування LDPC кодованого сигналу.

У системі застосовано такі каскади перемежування:

- а) бітове перемежування – рандомізація бітів в межах кодованого блоку;
- б) часове перемежування – перерозподіл даних кодованого блоку між символами OFDM в межах кадру T2. Це підвищує стійкість сигналу до імпульсного шуму і зміни характеристик тракту передавання.
- с) частотне перемежування – рандомізація даних в межах OFDM-символу з метою послабити ефект селективних частотних завмирань.

### Розворот модуляційного сузір'я

У T2 застосували додаткову процедуру оброблення модульованого сигналу, яка полягає в розвороті усіх векторів модульованого коливання на певний кут. Таку процедуру називають іще «розворот модуляційного сузір'я».

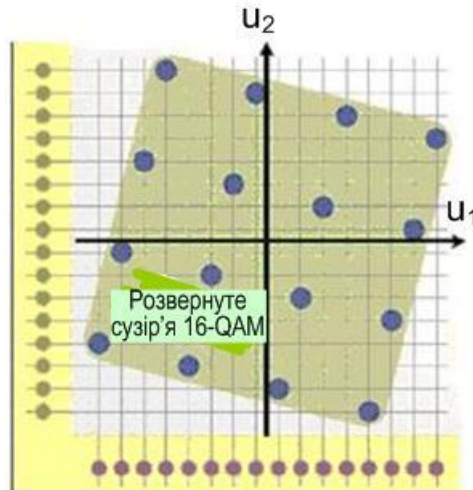


Рисунок 8 – Схема розвороту модуляційного сузір'я у разі модуляції 16-QAM

Такий поворот може істотно підвищити стійкість сигналу у разі виникнення типових проблемах ефіру. За рахунок повороту сузір'я на точно визначений кут кожна точка сузір'я набуває унікальні координати ( $u_1$  і  $u_2$ ). Така пара координат не може виникнути для інших векторів модульованого коливання. Принцип розвороту сузір'я проілюстровано на рис.8.

Кожну координату вектора обробляють в модуляторі окремо, а потім передають в OFDM-сигналі окремо, тобто  $u_1$  і  $u_2$  одного вектора передають на різних OFDM-носійних і в різних OFDM-символах.

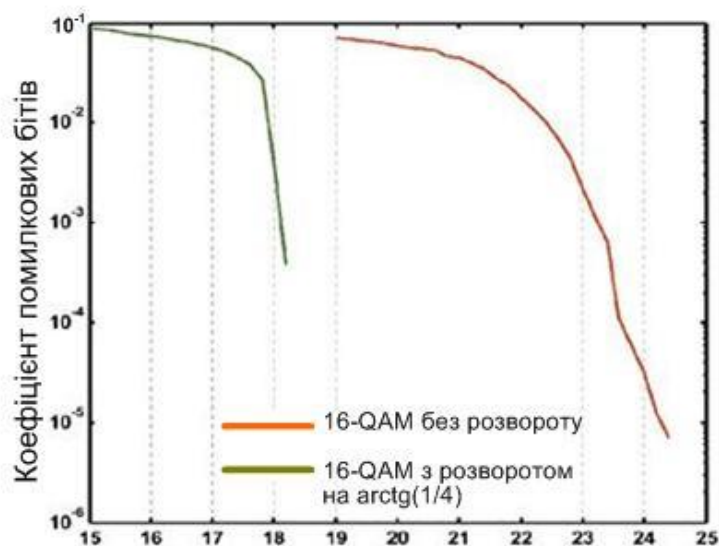


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнту помилкових бітів (BER) від виду сузір'я (визначено для відносної швидкості кодування 4/5 для каналу Релея з 15% завмирань)

У приймачі координати  $u_1$  і  $u_2$  знову об'єднують і формують, що дозволяє визначити положення точок модуляційного сузір'я, розвернутого по колу. У такому сузір'ї, якщо одну носійну або символ (передає одну із координат) буде

втрачено в результаті дії завад (інтерференції), з великою ймовірністю буде збережено інформацію про іншу координату, що дозволить відновити символ.

У разі використання симетричного (не повернутого) модуляційного сузір'я рознесення  $u_1$  і  $u_2$  сенсу не має тому, що символ можна ідентифікувати тільки за значеннями двох координат. Кожна з них окремо має двійників, і унікальним є тільки їх поєднання.

За результатами досліджень було визначено, що вигаш щодо порогового відношення  $C/N$  за рахунок застосування цієї технології може скласти до 5 дБ.

## 6. Багатоканальне приймання сигналів DVB-T2

У специфікації системи T2 передбачено додаткову можливість використовувати код Аламоуті, який створює можливість приймання сигналів одночасно від двох передавачів.

У 1998 році Аламоуті запропонував новий підхід до поділу MIMO-сигналів (MIMO – Multiple Input Multiple Output) на приймальній стороні.

Схема Аламоуті з рознесенням передаванням дозволяє зменшити коефіцієнт помилок, збільшити швидкість передавання або ємність каналу безпроводових систем зв'язку.

Нову схему, назвали на честь автора. Її віднесено до класу ортогонального блокового кодування (OSTBC – orthogonal space-time block codes). Принцип кодування за Аламоуті полягає в тому, що послідовність символів, яку слід передавати, розподіляють на пари (наприклад, суміжні парний і непарний символи)  $x_i$  й  $x_{i+1}$ . Для передавання такого блоку потрібні два випромінювача і два інтервали передавання. У першому інтервалі передавальна антена 1 випромінює сигнал символу  $x_i$ , тоді як антена 2 – сигнал  $x_{i+1}$ . У наступному часовому інтервалі антена 1 передає сигнал  $-x_{i+1}^*$ , а антена 2 – сигнал  $x_i^*$  (де «\*» - символ комплексно-спряженої величини).

Фізична сутність таких маніпуляцій з випромінюваними сигналами стає зрозумілою, якщо зробити їх математичний опис. Запишемо комплексну величину  $x$  через коефіцієнти дійсної та уявної частин ( $a$  й  $b$ ):

$$\begin{cases} x_i = a_i + jb_i \\ x_{i+1} = a_{i+1} + jb_{i+1} \\ x_i^* = a_i - jb_i \\ -x_{i+1}^* = -a_{i+1} + jb_{i+1} \end{cases}$$

Для приймання кодованого за схемою Аламоуті двосимвольного сигналу достатньо однієї прийомної антени і двох часових відліків сигнальної суміші. Таким чином, фактично можна застосувати систему MISO (MISO – Multiple Input Single Output). У результаті приймання сигнальної суміші протягом двох послідовних часових інтервалів отримаємо сукупність напруг  $y_i$  та  $y_{i+1}$ ,



$$\begin{cases} y_i = h_1 x_i + h_2 x_{i+1} + n_i \\ y_{i+1} = -h_1 x_{i+1}^* + h_2 x_i^* + n_2 \end{cases}$$

де  $n_i, n_{i+1}$  – відліки напруг внутрішнього шуму приймача, а  $h_1$  та  $h_2$  – передавальні характеристики каналів для сигналів, що випромінюють перша та друга антени, відповідно. Два часових відліки необхідно для того, щоб число рівнянь в системі дорівнювало числу невідомих.

Після встановлення зв'язку за відомим значенням передавальних характеристик декодують пари переданих символів із застосуванням співвідношень

$$\begin{cases} x_i = h_1 y_i^* + h_2 y_{i+1}^* \\ x_{i+1} = h_1 y_{i+1}^* + h_2 y_i^* \end{cases}$$

*Останні співвідношення є оптимальними оцінками максимальної правдоподібності.*

У випадку, коли на приймач надходять сигнали одразу від двох передавачів, наприклад, у разі приймання на ненаправлену антену у невеликій одночастотній мережі, застосування коду Аламоуті може значно поліпшити роботу системи.

Таке кодування спільно зі зміною формату пілот-сигналів надає можливість без втрат розділити і окремо декодувати сигнали, прийняті з двох різних ефірних каналів.

Відзначимо, що застосування коду не погіршує процес приймання, якщо на антену надходить тільки сигнал одного каналу. За розрахунками застосування коду Аламоуті дозволяє збільшити зону покриття невеликих одночастотних мереж до 30%.

### **Зменшення співвідношення пікової та середньої потужностей передавача**

Значна частка витрат на передавання телевізійного сигналу припадає на сплату за спожиту передавачами електроенергію. OFDM-сигнали характеризуються відносно високим відношенням пікової та середньої потужностей. У зв'язку з цим в T2 застосовано дві технології, що дозволяють знизити це співвідношення приблизно на 20%. А це, в свою чергу, істотно знижує витрати на електроживлення.

Застосовано такі дві технології:

- Резервування частотних складових. У цьому випадку 1% носійних залишається в резерві, і не переносить ніяких даних, але їх може бути використано передавачем для введення сигналів з метою «розмазати» піки.

- Активне розширення модуляційного сузір'я. У цьому випадку частину крайніх точок сузір'я зміщують далі від центру так, щоб це зменшувало піки сигналів. Оскільки зміни стосуються тільки крайніх точок, зміщеної зони, вільну від інших точок, така процедура не має істотного впливу на здатність приймача декодувати дані.

## 7. Додаткові функції і перспективи збільшення функціональності

У специфікації T2 передбачено два додаткові інструменти, які в перспективі можна буде використовувати для розширення кадру. По-перше, передбачено можливість введення сигналізації, рис.10, у структуру кадру T2 для нових типів кадрів, які може бути використано для передавання сигналів нового формату, який ще не визначено. Наявність сигналізації дозволить приймачу здійснювати детектування таких сигналів.

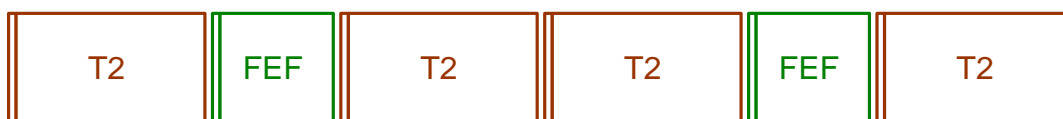


Рисунок 10 – Схема введення кадрів для майбутнього розширення функціональності (FEF) між кадрами потоку T2

Тобто зміст можливих нових кадрів FEF (Future Extension Frames) поки що не визначено. Уведення відповідної сигналізації в специфікацію T2 дозволяє приймачам першого покоління розпізнати і проігнорувати FEF-фрагменти. Але наявність зазначеної сигналізації забезпечить зворотну сумісність перших систем передавання з майбутніми, в яких ця сигналізація буде надавати інформацію про нові типи вмісту кадрів. Частотно-часова сегментація T2 також супроводжується сигналізацією, необхідною для майбутнього застосування частотно-часового розподілу на слоти (TFS – Time Frequency Slicing). Хоча в основній специфікації передбачено приймання без застосування TFS, в сигналізацію уведено позначки, які дозволять майбутнім приймачам, оснащеним двома тюнерами, працювати з TFS-сигналами. Такий сигнал будуть передавати у кількох РЧ каналах, і різні фрагменти кожної з послуг будуть в загальному випадку передаватися на різних частотах. Ресивер буде стрибками перебудовуватись з каналу на канал, збираючи фрагменти даних, які стосуються відповідної послуги.

Такий підхід дозволяє формувати пакети з розмірами, що значно перевищують допустимі для одного РЧ-каналу, що, в свою чергу, надає можливість виграшу за рахунок статистичного мультиплексування значної кількості каналів і гнучкості частотного планування.

### Пропускна спроможність системи

Пропускна спроможність системи T2 визначається вибором цілої низки системних параметрів. Для забезпечення гнучкості системі передбачено багато опцій. Вибір параметрів є процедурою оптимізації роботи системи, наприклад, пошук компромісу між часткою службової інформації і часом перемикання з каналу на канал або між пропускну здатністю і стійкістю до завад.

Широкий набір параметрів конфігурації також ускладнює порівняння з іншими системами. Так, наприклад, якщо порівнювати T2 з DVB-T, то для першої можна обрати параметри, що забезпечують таку ж поведінку сигналу в

стандартному гаусовому каналі, але обумовлюють велику стійкість T2 за умов складного приймання. Такий варіант вже відповідає значно більш високій пропускній здатності каналу T2 порівняно з DVB-T.

Таблиця 1 – Співставлення параметрів систем DVB-T та DVB-T2

	DVB-T (британський варіант)	DVB-T2
Модуляція	64-QAM	256-QAM
Розмірність ШПФ		
Захисний інтервал		
Коеф. помилкових бітів	2/3CC+RC(8%)	3/5LDPC+VCH(0,3%)
Розподілені пілот-сигнали	8%	1%
Постійні пілот-сигнали	2,6%	0,35%
Заголовок кадру	1%	0,7%
Смуга частот	Нормальна	Розширена
Пропускна здатність, Мбіт/с	24,1	35,9

Проте можна вибрати й варіант з трохи нижчими показниками для гаусового каналу, але як і раніше з дещо вищими для каналів, зі складними умовами приймання. У цьому випадку приріст пропускної здатності буде ще більше. Порівняльні характеристики систем з однаковою поведінкою в гаусовому каналі наведено в табл. 1.

Із наведених параметрів впливає що, очікуваний приріст пропускної спроможності щодо британського варіанту DVB-T складе близько 49%.

## Лекція 5

### СИСТЕМА ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ. СТАНДАРТ DVB-S

*Навчальні питання:*

1. Загальна характеристика стандарту DVB-S.
2. Структурна схема передавальної частини стандарту DVB-S.
3. Загальна схема оброблення сигналів у системі DVB-S.
4. Експлуатаційні параметри системи DVB-S

#### 1. Загальна характеристика стандарту DVB-S

Супутникове телевізійне мовлення (*SAT TV*) було і залишається найшвидшим, надійним і економічним способом передавання телевізійного сигналу високої якості у будь-яке місце великої зони обслуговування.

Усі радіомовні штучні супутники Землі (ШСЗ) розміщують на геостаціонарній орбіті (ГО) – круговій орбіті заввишки приблизно 36000 км в площині екватора. Супутник на геостаціонарній орбіті нібито нерухомий відносно поверхні Землі, тому що обертається з тією ж кутовою швидкістю, що і Земля. Зона видимості геостаціонарного ШСЗ – близько однієї третини земної поверхні.

Для супутникового телевізійного мовлення виділено спеціальні діапазони радіочастотного спектру в сантиметровому діапазоні хвиль, де передбачено можливість підвищення щільності потоку потужності з ШСЗ. Основний частотний діапазон для супутникового мовлення – це  $K_U$ -діапазон з частотами 11,7 ... 12,5 ГГц. Потужність супутникового сигналу в точці приймання характеризується еквівалентною ізотропно випромінюваною потужністю (ЕІВП), що є добутком вихідної потужності передавача супутникового ретрослятора на коефіцієнт підсилення передавальної антени в даному напрямку. ЕІВП зазвичай подають у дБ × Вт (*dBW*). Ця потужність знаходиться в межах 45 ... 60 дБВт. У сусідніх діапазонах 10,7 ... 11,7 ГГц і 12,5 ... 12,75 ГГц передавання сигналів здійснюють супутники фіксованої супутникової служби з типовими значеннями ЕІВП 38 ... 52 дБВт.

Однією з особливостей застосування ШСЗ є обмеженість енергетичного потенціалу супутникового ретранслятора, тому в системах супутникового радіомовлення традиційно використовують методи оброблення сигналів, що забезпечують нормальне функціонування за мінімального відношення сигнал/шум ( $C/N$ ) на вході демодулятора в обмін на смугу частот сигналу.

В аналоговому супутниковому телевізійному мовленні вибір було зроблено на користь частотної модуляції (замість амплітудної), а в цифровому телевізійному мовленні доводиться застосовувати потужне каскадне завадостійке кодування і модуляцію з невисокими кратностями (наприклад, ФМ-4 (*QPSK*) замість більш високошвидкісної КАМ-16 (16 *QAM*)). Додатковою особливістю цифрового супутникового телевізійного мовлення є той факт, що багатопрог-

рамне мовлення здійснюють за рахунок мультиплексування телевізійних програм у цифровому потоці, а функціонування супутникового передавача відбувається тільки на одній носійній частоті у нелінійному режимі, що дозволяє підвищити його вихідну потужність на 2,5 ... 4 dB. Таке підвищення енергетики еквівалентне зменшенню діаметру рефлектора приймальної антени у 2 рази в порівнянні з прийманням сигналів аналогового телебачення.

У 1994р. силами консорціуму *DVB Project* було створено Європейський стандарт супутникової цифрової системи багатoprogramного телевізійного мовлення – стандарт *DVB-S*, який призначено використовувати у смузі частот 11/12 ГГц (*European Standard EN 300 421 v.1.1.2, 1997-08*). Для забезпечення потреб супутникового телебачення виділено смуги частот в діапазонах 12, 29, 40 та 85 ГГц. У діапазонах 40 ГГц і 85 ГГц виділено спектр частот завширшки в 2 ГГц.

У жовтні 1996р. було схвалено проект Рекомендації стосовно загальних функціональних вимог до багатoprogramних систем супутникового телевізійного мовлення у смузі частот 11/12 ГГц, а вже в жовтні 1999р. – розроблено проект нової Рекомендації, що враховує наявність у світі існують чотирьох схожих за архітектурою систем: стандарт *DVB-S* (Система А), *DSS* (Система В), *G1-MPEG-2* (Система С) і *ISDB-S* (Система D).

Систему А (стандарт *DVB-S*) розроблено європейським консорціумом *DVB Project* і призначено для передавання сигнальних потоків багатoprogramного телевізійного мовлення або телебачення високої чіткості (ТВЧ) у частотних діапазонах фіксованої і радіомовної супутникових служб (10,7 ... 12,75 ГГц) з їх безпосереднім прийманням на домашні інтегральні приймачі-декодери, а також на приймачі з'єднані із системами колективних супутникових телевізійних антенами *SMATV (Satellite Master Antenna TV)*, і системами кабельного телебачення (СКТ) на етапах первинного і вторинного розподілу програм телевізійного мовлення. Певний час практично все цифрове супутникове телевізійне мовлення на всі п'ять континентів здійснювалось за стандартом *DVB-S*.

Існує два основних способи цифрового передавання супутникових сигналів:

- передавання  $N$  стиснутих цифрових сигнальних потоків на  $N$  носійних частотах;
- мультиплексування  $N$  стиснутих цифрових сигнальних потоків в один і їх передавання на одній носійній частоті.

Кількість програм телевізійного мовлення, яку можна передавати за допомогою одного супутникового транспондера, залежить від необхідної швидкості передавання інформації, компонентного або композитного формату кодування для джерела сигналу, якості і роздільної здатності вихідного зображення, критичності алгоритму стиснення до деяких видів зображень і необхідної якості відновленого зображення.

Досягнення у сфері стиснення даних дозволяє організувати велику кількість цифрових високоякісних телевізійних каналів з відносно малими швидкостями (менше 1 Мбіт/с, що еквівалентно 20-25 ТВ каналів у стандартній смузі

супутникового каналу завширшки 27 МГц). У багатьох випадках допустимою є швидкість 400 кбіт/с, що може забезпечити більш як 60 ТВ каналів з одного транспондера.

## 2. Структурна схема передавальної частини стандарту DVB-S

Структурну схему обладнання передавальної частини стандарту DVB-S наведено на рис.1. У передавальному обладнанні здійснюють такі перетворення потоку даних для його адаптації до каналу:

- мультиплексування транспортних пакетів і формування квазівипадкової послідовності (рандомізація) для рівномірного розподілу (дисперсії) енергії в часі;
- зовнішнє кодування із застосуванням коду Ріда-Соломона (RS);
- згорткове перемежування і внутрішнє кодування із застосуванням згорткових кодів з прорізуванням;
- формування сигналу в основній смузі частот і його модуляція.

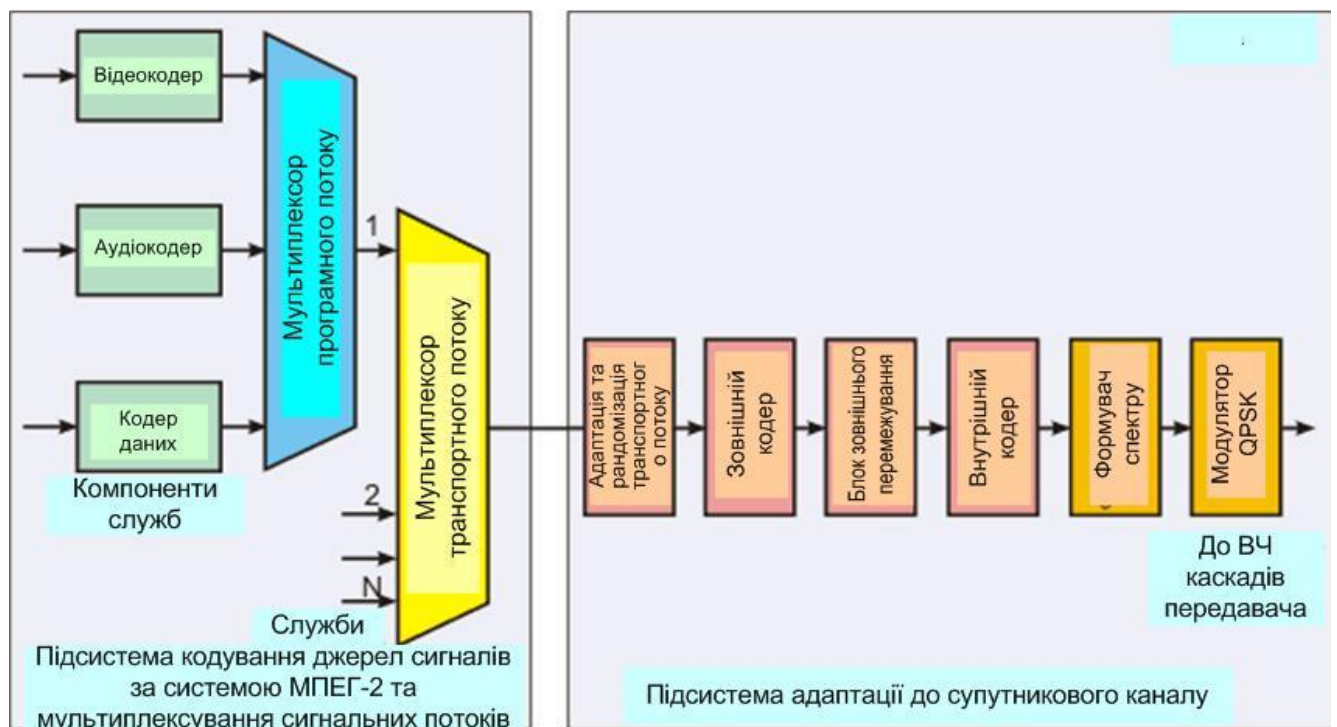


Рисунок 1 – Структура передавального обладнання системи DVB-S

Для супутникових систем телевізійного мовлення характерною особливістю є обмеженість потужності сигналу, яку може забезпечити супутниковий передавач, а, отже, підвищена чутливість до впливу шумів і інтерференційних завад. Одночасне використання енергетично ефективної чотирифазної модуляції ФМ-4 (QPSK) і каскадного кодування для каналу із застосуванням укороченого коду RS і згорткового коду у поєднанні з алгоритмом декодування Вітербі з м'яким прийняттям рішення забезпечує високу стійкість системи щодо впливу

шумових завад, а також нелінійності амплітудної характеристики передавача бортового ретранслятора (що забезпечує можливість функціонування з використанням збільшеної потужності).

### 3. Загальна схема оброблення сигналів у системі DVB-S

Структурна схема блоків адаптації до каналу стандарту DVB-S передавальної та приймальної апаратури наведено на рис.2.

Завдяки узгодженому фільтруванню й безпосередньому виправленню помилок, високу якість приймання забезпечено навіть за екстремальних умов, коли рівень мінімального сигналу близький до граничного значення визначеного граничним значенням високочастотного відношення сигнал/шум ( $C/N$ ) і сигнал/(інтерференційна завада) ( $C/I$ ). У такому випадку гарантовано виникнення не більше однієї помилки на годину, що еквівалентно ймовірності помилок близько  $10^{-10} \dots 10^{-11}$  на вході демультіплексора *MPEG-2* в приймачі-декодері.

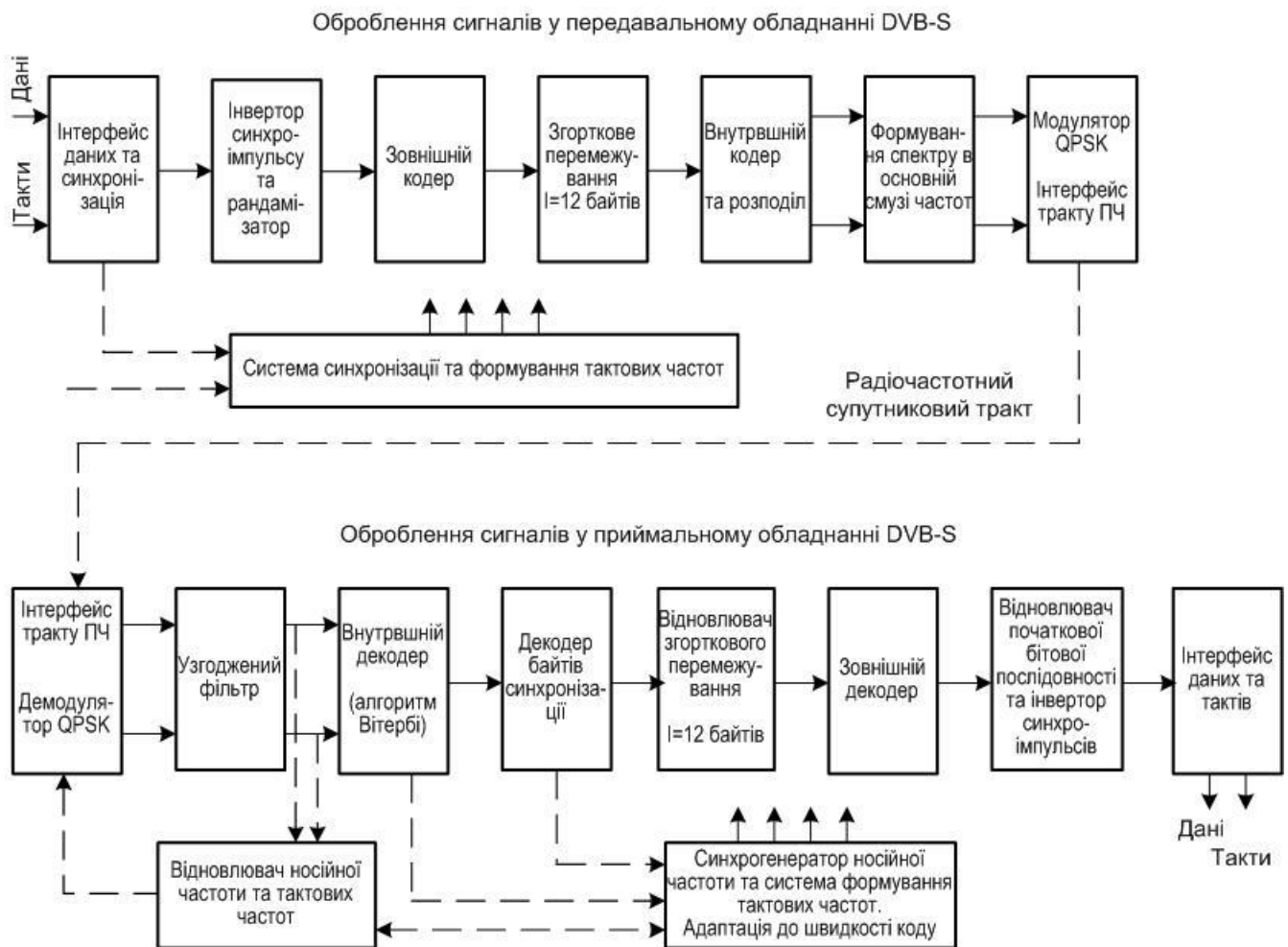


Рисунок 2 – Структурна схема блоків адаптації до каналу стандарту DVB-S

#### 4. Експлуатаційні параметри системи DVB-S

Для узгодження радіосигналу з частотною смугою і енергетичними характеристиками конкретного транспондера встановлюють необхідне співвідношення  $BW/R_s$ , де  $BW$  – смуга транспондера за рівнем – 3 дБ,  $R_s$  – швидкість символного потоку. Так, у разі модуляції ФМ-4 ( $QPSK$ ), швидкості загорткового коду  $R$  і швидкості  $RS$ -коду 188/204, відповідна швидкість передавання інформаційних символів складе:

$$R_U = R (2R_s) (188/204) = 1,843 R R_s.$$

Для даної швидкості символів  $R_s$  може бути обрано одне з 5 значень кодової швидкості внутрішнього загорткового коду, що відповідно змінює отриману швидкість символів  $R_U$  і спектральну ефективність системи  $C_U = R_U/BW$ . Можливі різні варіанти співвідношення швидкостей передавання  $R$ ,  $R_s$ ,  $R_U$  і ефективності  $C_U$  від смуги транспондера. Для значення співвідношення  $BW/R_s = 1,28$  й модуляції ФМ-4 значення параметрів наведено у табл.1.

Таблиця 1 – Експлуатаційні параметри системи для випадку  $BW/R_s = 1,28$  й модуляції ФМ-4

BW, МГц	Rs, Мсим/с	R = 1/2		R = 2/3		R = 3/4		R = 5/6		R = 7/8	
		Ru, Мбіт/с	Cu, біт/(сГц)	Ru, Мбіт/с	Cu, біт/(сГц)	Ru, Мбіт/с	Cu, біт/(сГц)	Ru, Мбіт/с	Cu, біт/(сГц)	Ru, Мбіт/с	Cu, біт/(сГц)
54	42,2	38,9	0,72	51,8	0,96	58,3	1,08	64,8	1,2	68	1,26
46	35,9	33,1	0,72	44,2	0,96	49,7	1,08	55,2	1,2	58	1,26
40	31,2	28,8	0,72	38,4	0,96	43,2	1,08	48	1,2	50,4	1,26
36	28,1	25,9	0,72	34,6	0,96	38,9	1,08	43,2	1,2	45,4	1,26
33	25,8	23,8	0,72	31,7	0,96	35,6	1,08	39,6	1,2	41,6	1,26
30	23,4	21,6	0,72	28,8	0,96	32,4	1,08	36	1,2	37,8	1,26
27	21,1	19,4	0,72	25,9	0,96	29,2	1,08	32,4	1,2	34	1,26
26	20,3	18,7	0,72	25	0,96	28,1	1,08	31,2	1,2	32,8	1,26



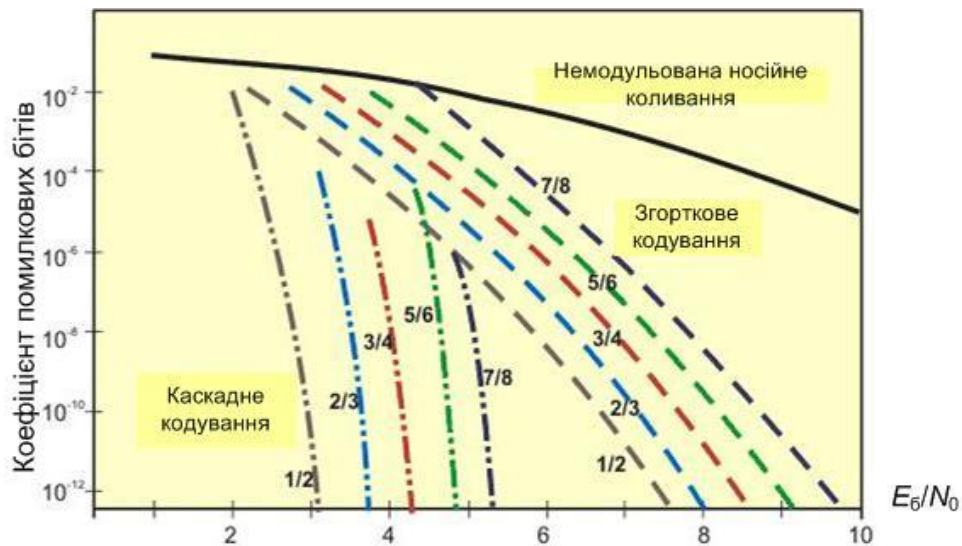


Рисунок 3 – Графіки залежності коефіцієнту помилкових бітів від параметрів кодування

Вище було зазначено, основним видом модуляції у стандарті DVB-S є модуляція ФМ-4 (QPSK), хоча в окремих випадках може бути використано ФМ-8 (8-PSK) або КАМ-16 (16-QAM). Застосування завадостійкого кодування дозволяє значно знизити вимоги щодо значення співвідношення  $E_6/N_0$  для сигналу модульованого методом ФМ-4 (відношення енергії в одному байті інформації до густини потужності шуму, рис.3), а для модуляції більшої кратності порогове значення  $E_6/N_0$  виявляється трохи вище (табл.2).

Таблиця 2 – Порівняльні параметри сигналів за різних методів модуляції

Модуляція	Швидкість внутрішнього коду	Спектральна ефективність, біт/Гц	Запас на реалізацію модема, дБ	$E_6/N_0$ ( $2 \times 10^{-4}$ )
ФМ-4 (QPSK)	1/2	0,92	0,8	4,5
	2/3	1,23	0,8	5
	3/4	1,38	0,8	5,5
	5/6	1,53	0,8	6
	7/8	1,61	0,8	6,4
ФМ-8 (8PSK)	2/3	1,84	1	6,9
	5/6	2,3	1,4	8,9
	8/9	2,46	1,5	9,4
КАМ-16 (16QAM)	3/4	2,76	1,5	9
	7/8	3,22	2,1	10,7

## Лекція 6

### **СТАНДАРТ DVB-S2. СИСТЕМА супутникового ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ**

*Навчальні питання:*

1. Основні характеристики DVB-S2
2. Зауваження стосовно коефіцієнта скруглення характеристики фільтру
3. Особливості системними DVB-S2
4. Режими, що забезпечують зворотну сумісність супутникових систем DVB-S2 та DVB-S
5. Ієрархічна модуляція у системі DVB-S2

Стандарт системи другого покоління DVB-S2 для відеомовлення, інтерактивних послуг, збору новин та інших широкосмугових супутникових (SAT) телекомунікаційних послуг є доповненням до стандарту супутникового телевізійного мовлення DVB-S, що набув розповсюдження у світі.

Новий стандарт було розроблено консорціумом DVB Project (Digital video Broadcasting Project – Проект цифрового відеомовлення – організація, що здійснює розроблення стандартів у галузі цифрового телебачення для Європи). Технічні характеристики цього стандарту було детально досліджено Спільним Технічним комітетом (JTC - Joint Technical Committee) радіомовлення Європейського Союзу радіомовлення (RBU - European Broadcasting Union), Європейським комітетом з електротехнічної стандартизації CENELEC та Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI - European Telecommunications Standards).

#### **1. Основні характеристики DVB-S2**

DVB-S2 – це DVB специфікація для широкосмугових супутникових систем другого покоління, яку розроблено на підґрунті відпрацьованих технологій DVB-S і DVB-DSNG (Digital Satellite News Gathering – цифрова супутникова відео журналістика). Коли говорять про DSNG, то зазвичай йдеться про пересувні системи передавання ТВ інформації з місць подій, тобто, про те, що називають системами збирання новин.

Систему DVB-S2 було розроблено для:

- послуг ТВ мовлення стандартної чіткості (SDTV) і ТВ високої чіткості (ТВЧ або HDTV);
- інтерактивних послуг, разом з доступом до Internet;
- професійного застосування.

Для забезпечення реалізації поставлених завдань у системі DVB-S2 використано останні, на час створення, досягнення як щодо модуляції, так до кодування каналу, що дозволило збільшити пропускну спроможність системи прибі-

лизно на 30% порівняно з DVB-S. У процесі формування сигнального потоку передбачено можливість застосовувати широкий набір адаптивного кодування, модуляції і рівнів захисту від помилок (тобто швидкості кодування).

За допомогою зворотного каналу (а це може бути будь-який фізичний канал, яким може бути й телефонна лінія), на передавач може надходити інформація про умови приймання сигналів, що надає можливість оптимізувати параметри передавача для кожного індивідуального користувача в режимі мовлення «точка-точка».

З метою забезпечити компроміс між величиною випромінюваної потужності і спектральною ефективністю, в системі DVB-S2 передбачено розширений набір швидкостей кодування (1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 і 9/10), які може бути застосовано за різних режимів модуляції (QPSK, 8PSK, 16APSK та 32APSK). Так, швидкості кодування 1/4, 1/3 і 2/5 було введено для роботи в комбінації з ВФМ-4 (QPSK) модуляцією за найгірших умов зв'язку, коли рівень сигналу нижче рівня шуму (рис.1).

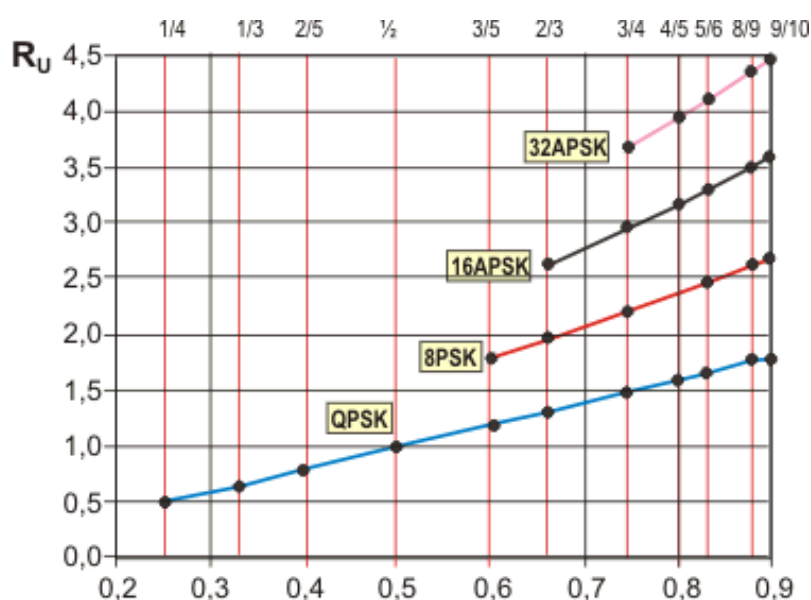


Рисунок 1 – Рівень порогового значення сигнал/шум для радіосигналу залежно від швидкості завадостійкого кодування LDPC

Формати QPSK і 8PSK запропоновано для передавання сигнальних потоків цифрового телевізійного мовлення і їх можна використовувати в супутникових транспондерах, що функціонують в режимі, близькому до насичення.

Формат 32APSK (амплітудно-фазова маніпуляція) передбачено застосовувати у разі лінійного режиму роботи транспондера. Для успішного використання цього формату має бути забезпечено достатньо високий рівень відношення сигнал/шум для радіосигналу  $C/N$ . Цей формат забезпечує найбільшу пропускну здатність телекомунікаційної системи, але через зазначені вище вимоги його використовують, в основному, для обслуговування професійних каналів зв'язку.

Формат 16APSK може бути застосовано для забезпечення передавання інформаційних потоків, пов'язаних з різними інформаційними послугами, серед

яких і програми цифрового телебачення. Для успішного застосування використовують спеціальні схеми коригування сигналів.

Модуляційні сузір'я 16APSK та 32APSK оптимізовано для роботи з нелінійною амплітудною характеристикою транспондера шляхом розміщення точок сузір'я на колах (рис.2). Проте їх робочі характеристики у лінійному каналі сумісні з традиційними форматами 16 QAM і 32 QAM відповідно.

Залежно від вибору модуляційного сузір'я (способу модуляції) та швидкості кодування, може бути досягнуто різної ефективності використання радіочастотного спектра  $R_u$  від 0,5 до 4,5 біт/с/Гц (рис.1).

У DVB-S2 передбачено три коефіцієнти скруглення спектра (фактор roll-off):  $\alpha = 0,35$  (як і в DVB-S),  $\alpha = 0,25$  і  $\alpha = 0,2$  (наближення до прямокутної форми), що додатково збільшує пропускну здатність, хоча і висуває великі вимоги до лінійності амплітудної характеристики транспондера.

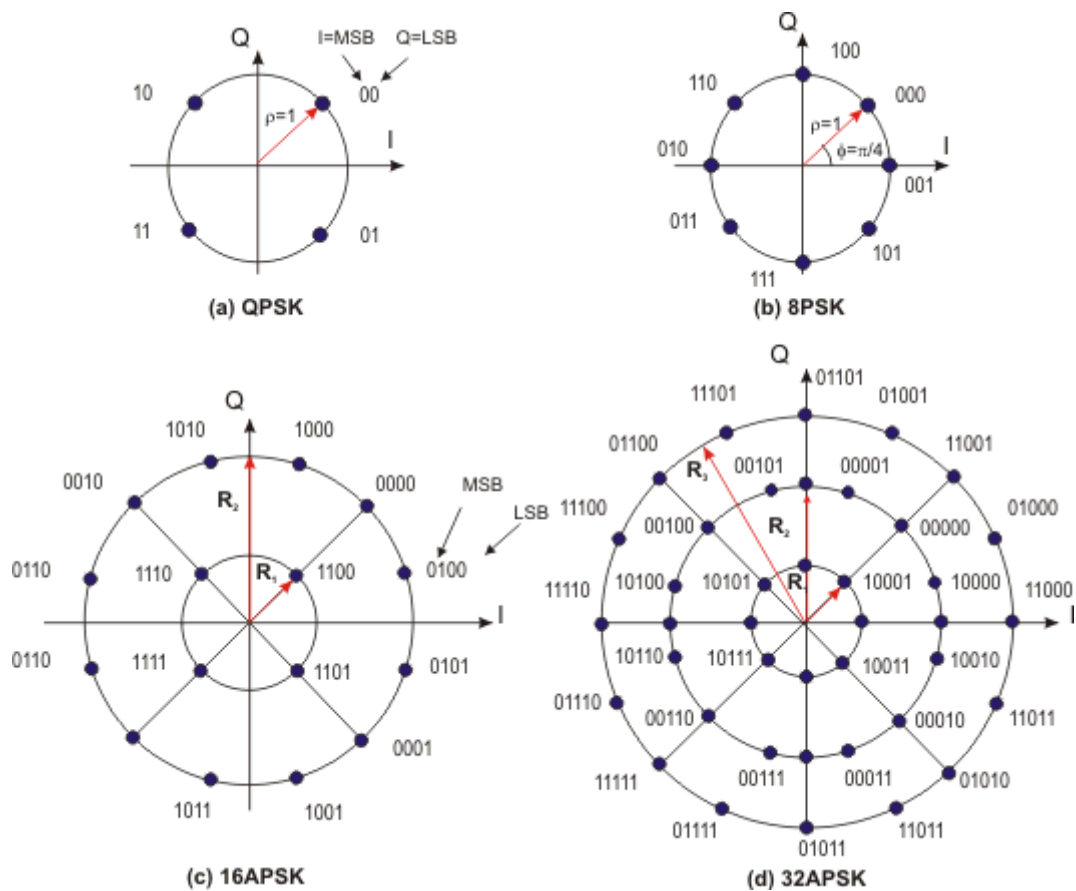


Рисунок 2 – Модуляційні сузір'я багаторівневих фазоманіпульованих сигналів

## 2. Зауваження стосовно коефіцієнта скруглення характеристики фільтру

Якщо  $T_c$  – тривалість сигнального символу, смугу частот від  $-1/2T_c$  до  $1/(2T_c)$  називають смугою Найквіста – це мінімальна необхідна ширина смуги частот відповідно до теореми Найквіста.

Прикладом фільтрів, що задовольняють критерію Найквіста, є ідеальний фільтр, що має прямокутну амплітудно-частотну характеристику зі смугою Найквіста (рис. 3, синій контур), і фільтри з характеристикою у формі піднятого косинуса, RRC, (рис. 3, характеристики інших кольорів), що мають симетрію відносно точки  $1/(2T_c)$ .

Коефіцієнт скруглення (roll-off factor) Альфа (Alpha) характеризує форму фільтра Найквіста з частотною характеристикою «піднятий косинус» (рис. 3). Цей коефіцієнт також називають спадом (roll-off) фільтра або коефіцієнтом надлишкового розширення частотної смуги (excess bandwidth factor).

Більше значення «альфа» обумовлює збільшення робочої частотної смуги понад теоретичний мінімум.

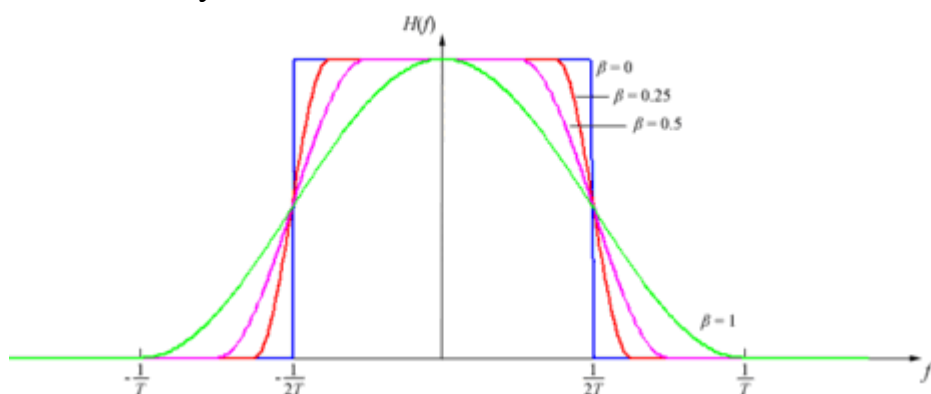


Рисунок 3 – Амплітудно-частотна характеристика фільтра «піднятий косинус»

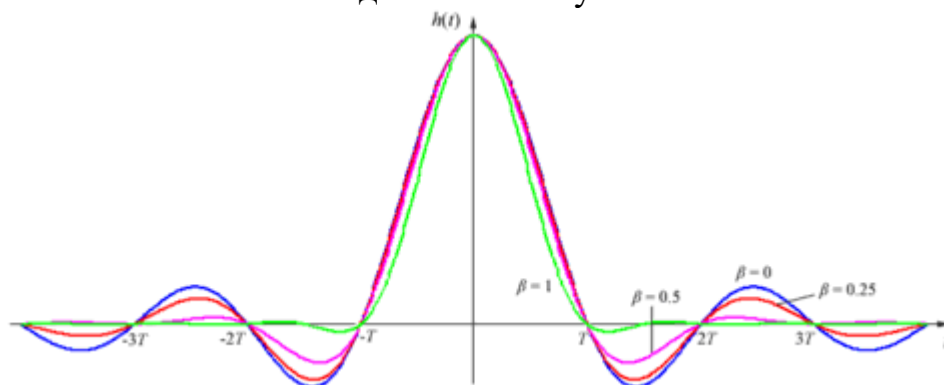


Рисунок 4 – Імпульсна характеристика фільтра «піднятий косинус»

АЧХ фільтра з характеристикою «піднятий косинус» подають кусочною функцією:

$$K(f) = \begin{cases} 1, & |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T_c}, \\ \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi T_c}{\alpha} \left[ |f| - \frac{1-\alpha}{2T_c} \right] \right) \right], & \frac{1-\alpha}{2T_c} < |f| < \frac{1+\alpha}{2T_c}, \\ 0, & \text{для інших значень } f. \end{cases} \quad (1)$$

Для  $\alpha = 0$ , фільтр з мінімальною смугою  $f = 1/(2T_c)$ , не можливо реалізувати фізично;

Для  $\alpha = 0,5$  – фільтр з 50% розширенням смуги;

Для  $\alpha = 1$  – фільтр з подвоєною смугою пропускання.

Величина використовуваного коефіцієнта скруглення впливає на форму квадратурних компонентів, векторної діаграми і, в кінцевому рахунку, спектра сформованого сигналу.

### 3. Особливості системними DVB-S2

Система DVB-S2 забезпечує можливість використовувати різні режими передавання: «одна носійна на транспондер» або «багато носійних на транспондер». У другому випадку застосовують частотне мультиплексування – FDM. У разі використання однієї носійної радіочастотного сигналу символна швидкість передавання  $R_s$  буде відповідною смузі пропускання транспондера ( $BW = R_s$ ).

У випадку застосування кількох носійних,  $R_s$  буде відповідати виділеній частотній смузі даної послуги. Максимальна кількість сигнальних потоків різних послуг обмежена частотною смугою транспондера, необхідною пропускну здатністю каналу для кожної послуги, припустимим рівнем взаємних завад між смугами суміжних носійних.

У разі застосування однієї носійної система може нормально функціонувати з використанням радіоканалів, що характеризуються різними рівнями сигнал/шум радіочастотного сигналу ( $C/N$ ) від -2,4 дБ (модуляція QPSK, швидкість коду 1/4) до 16 дБ (модуляція 32APSK, швидкість коду 9/10), залежно від обраної швидкості кодування і способу модуляції.

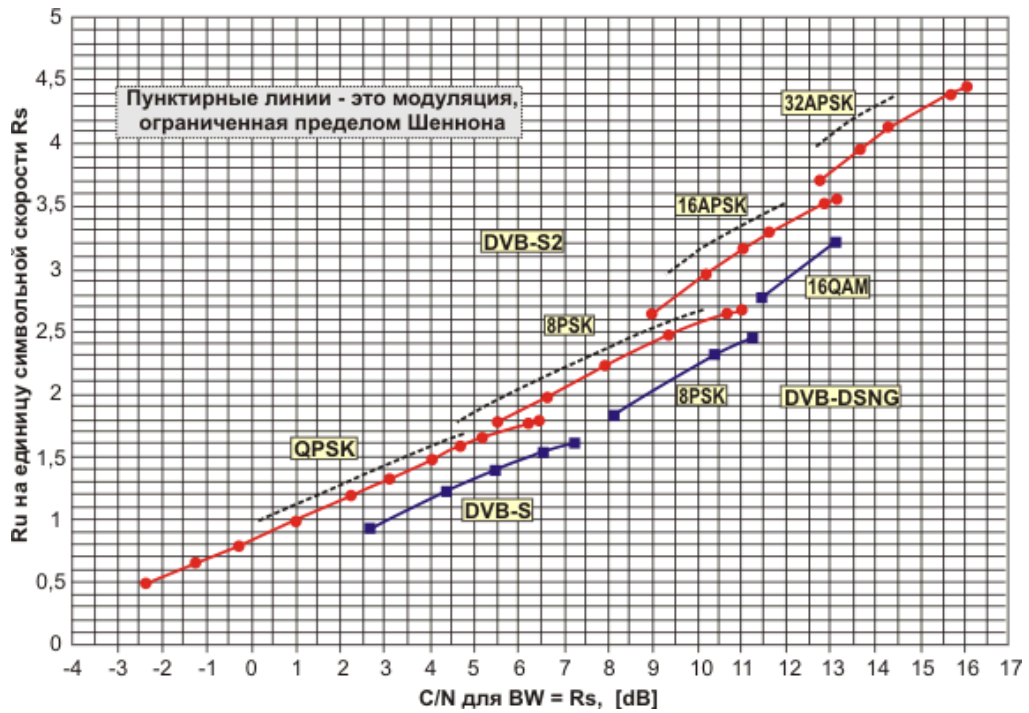


Рисунок 5 – Залежність спектральної ефективності DVB-S2

За оціночними розрахунками для системи DVB-S2 ймовірність виникнення помилкового пакета  $10^{-7}$  так само, як і в системі DVB-S/DVB-DSNG призводить до появи одного помилкового інформаційного транспортного пакету TS за годину передавання сигналу цифрового телебачення зі швидкістю 5 Мбіт/с.

У традиційному каналі з гаусовим шумом збільшення пропускної спроможності системи DVB-S2 (рис. 5) складає 20...35% порівняно з DVB-S і DVB-DSNG за однакових умов передавання, що еквівалентно зменшенню порогового рівня сигнал/шум на 2 ... 2,5 дБ за тієї ж спектральної ефективності  $R_u$ .

На рис.6 наведено спектральну ефективність DVB-S2 для постійної частотної смуги пропускання супутникового каналу  $BW = R_s \cdot (1 + \alpha)$  з гаусовим шумом за умов ідеальної демодуляції. На графіках, наведених на рис.4, не враховано погіршення характеристик обумовлене зміною форми спектра сигналу через зменшення коефіцієнта скруглення ( $\alpha$ ). Під час розрахунку для системи DVB-DSNG застосовано  $\alpha = 0,35$ .

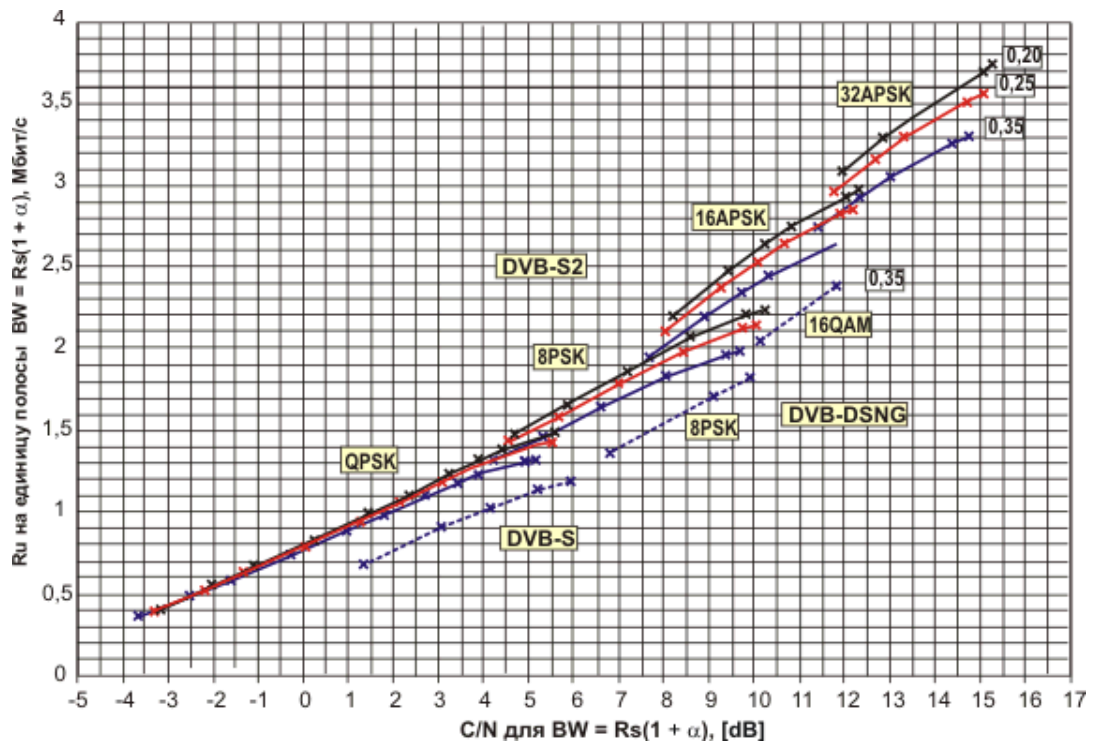


Рисунок 6 – Залежність спектральної ефективності DVB-S2 з урахуванням коефіцієнту округлення каналного фільтра

Для режимів APSK (тобто з амплітудною і фазовою модуляціями) можливе введення випереджальної корекції сигналів на передавальній стороні, що дозволяє використовувати вихідний каскад підсилювачів супутникового передавача у режимі, близькому до насичення, тим самим буде збільшено вихідну потужність, що особливо важливо для режиму 32 APSK. Для таких випадків використовують спеціальні професійні конвертори з малим коефіцієнтом шуму (LNC), ціна на які вище, ніж на побутові конвертери.

У разі застосування множини носійних частот для передавання інформаційного потоку уведення до конфігурації ретранслятора схеми випереджальної корекції не дає додаткового позитивного результату ні для однієї з схем модуляції. Виходячи з цього, доводиться знижувати вихідну потужність передавача (тобто працювати у квазілінійному режимі), що призводить до зменшення відношення  $C/N$  в точці приймання.

#### 4. Режими, що забезпечують зворотну сумісність супутникових систем DVB-S2 та DVB-S

У системі DVB-S2 передбачено можливість передавати в одному супутниковому каналі зв'язку два інформаційні транспортні потоки TS. Перший потік (з високим пріоритетом – HP) призначено як для DVB-S, так і для DVB-S2 приймачами. Другий потік (з низьким пріоритетом – LP) будуть приймати тільки DVB-S2 приймачі. Наявність двох потоків викликано прогнозованим досить тривалим перехідним періодом від системи DVB-S до DVB-S2, що обумовлено великою кількістю DVB-S приймачів наявних на тепер у населення. Тільки в кінці перехідного періоду буде здійснено перехід до модуляції радіочастотного



сигналу повністю за технологією DVB-S2, що забезпечить можливість максимально використовувати технічні можливості системи

Зворотню сумісність може бути забезпечено двома способами:

1. Із застосуванням багаторівневої модуляції в асинхронному режимі. Такий робочий режим є традиційним для ВЧ цифрових каналів. Тому цей режим не було спеціально відображено у специфікації DVB-S2.

У разі застосування такого режиму DVB-S сигнал передають зі значно більшою випромінюваною потужністю порівняно з сигналом DVB-S2. Тобто, певним чином незалежно сформований сигнал DVB-S2 додають до більш потужного сигналу DVB-S.

Для забезпечення можливості надійного детектування такого сигналу необхідно забезпечити режим з малими амплітудними спотвореннями, тобто – режим роботи вихідних каскадів передавача супутникового транспондера у квазі лінійному режимі. Може бути застосовано алгоритм формування ієрархічного сигналу, в якому HP і LP складові підсилюють окремими підсилювачами, що функціонують у режимах близьких до насичення, а потім ці сигнали додають перед безпосереднім випромінюванням. Однак, такий підхід вимагає розроблення і запуску супутників нового покоління, що зможуть забезпечити згаданий алгоритм.

2. Ієрархічна модуляція, за якої два інформаційних транспортних потоки TS – HP і LP синхронно упорядковують на символному рівні нерівномірної 8-ФМ (8PSK) модуляції. Оскільки сумарний сигнал у цьому випадку буде мати квазіпостійну обвідну (відсутність амплітудної модуляції), то його можна передавати одним передавачем, що функціонує в режимі близькому до насичення. Такий режим передбачено у стандарті DVB-S2 як робочий варіант.

## **5. Ієрархічна модуляція у системі DVB-S2**

Для здійснення ієрархічної модуляції, передбачено використовувати два паралельні канали (рис.7): DVB-S і DVB-S2.

Перший канал призначено для формування високо пріоритетного сигналу DVB-S розрахованого на модуляцію ФМ-4 (QPSK). Сигнальний потік другого каналу (*LP* – низький пріоритет) збільшує розмірність модуляції до нерівномірної ФМ-8 (8PSK) (рис.8).

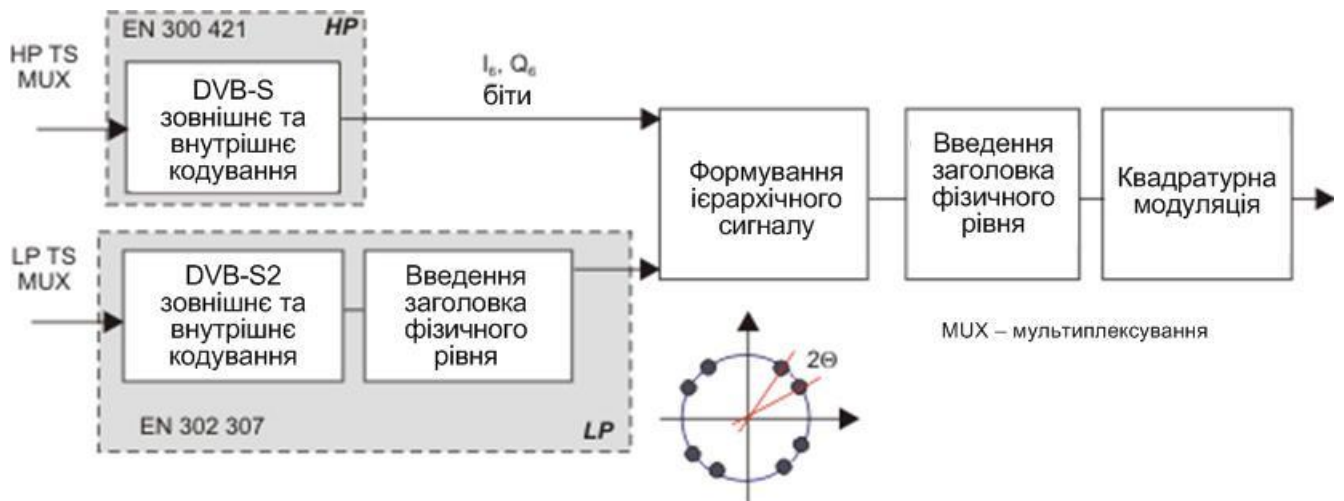


Рисунок 7 – Структура процесу ієрархічної модуляції

У такому режимі з усіх можливих форматів потоку DVB-S2 дозволено застосовувати тільки кадр після випереджальної корекції з 64800 бітами (720 слотів × 90 біт). Кут девіації (відхилення)  $\theta$  (рис.8) може бути змінено на вимогу користувача. Великі кути  $\theta$  дозволяють здійснювати детектування LP потоку за менших значень  $C/N$ , але погіршують  $C/N$  для HP сигналу.

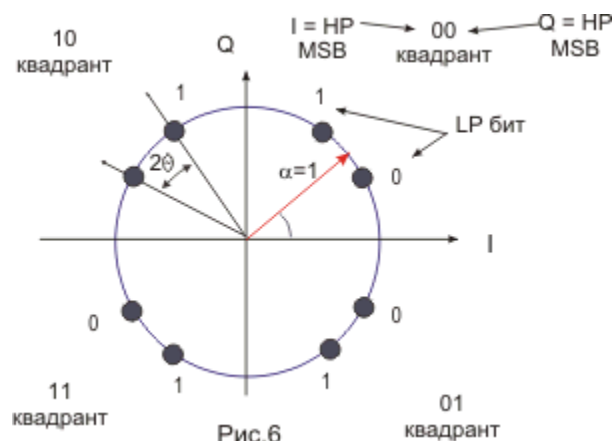


Рис.6

Рисунок 8 – Структура ієрархічного модуляційного сузір'я

У табл.1 наведено відношення швидкостей передавання даних (у %) LP потоку відносно HP потоку (LP/HP). У технічному звіті запропоновано формулу для розрахунку необхідного відношення сигнал/шум для каналу з низьким пріоритетом  $C/N_{LP}$ :

$$C/N_{LP} = C/N_{QPSK} - 3 + \Delta_L + M \quad (2)$$

де:  $C/N_{QPSK}$  необхідно взяти з табл.2 для ймовірності пакетної помилки  $10^{-7}$  (канал AWGN);

$M$  – конструктивний коефіцієнт запасу (мінімальне значення  $M = 0,8$  дБВ);

$$\Delta_L = -20\lg(\sin\theta) \quad (3)$$

Таблиця 1

DVB-S кодування (HP)	DVB-S2 кодування (LP)			
	1/4	1/3	1/2	3/5
1/2	26,6	35,7	53,7	64,6
2/3	20	26,7	40,3	48,4
3/4	17,8	23,8	35,8	43
5/6	16	21,4	32,2	38,7
7/8	15,2	20,4	30,7	36,9

Таблиця 2

Режим	Спектральна ефективність	Ідеальне значення Es/No (дБ) для кодованого кадру завдовжки 64 800 бітів
QPSK 1/4	0,49	-2,35
QPSK 1/3	0,66	-1,24
QPSK 2/5	0,79	-0,3
QPSK 1/2	0,99	1
QPSK 3/5	1,19	2,23
QPSK 2/3	1,32	3,1
QPSK 3/4	1,49	4,03
QPSK 4/5	1,59	4,68
QPSK 5/6	1,65	5,18
QPSK 8/9	1,77	6,2
QPSK 9/10	1,79	6,42
8PSK 3/5	1,78	5,5
8PSK 2/3	1,98	6,62
8PSK 3/4	2,23	7,91
8PSK 5/6	2,48	9,35
8PSK 8/9	2,65	10,69
8PSK 9/10	2,68	10,98
16APSK 2/3	2,64	8,97
16APSK 3/4	2,97	10,21
16APSK 4/5	3,17	11,03
16APSK 5/6	3,3	11,61
16APSK 8/9	3,52	12,89
16APSK 9/10	3,57	13,13
32APSK 3/4	3,7	12,73
32APSK 4/5	3,95	13,64
32APSK 5/6	4,12	14,28
32APSK 8/9	4,4	15,69
32APSK 9/10	4,45	16,05

На рис.9 наведено графіки залежності порогових значень  $C/N$  для HP і LP потоків від кута  $\theta$  для нерівномірної модуляції ФМ-8 (8PSK) за різних швидкостей кодування. Пунктирними лініями на рис на рис.9 вказано межі реалізації режиму сумісного каналу. Можна відзначити, що зі збільшенням кута  $\theta$ , модуляційне сузір'я набуває вигляду стандартної ФМ-8 (8PSK) (рис.2). Розрахунки зроблено для найгіршого випадку ( $\alpha = 0,2$ ) для символної швидкості 20 Мбод.

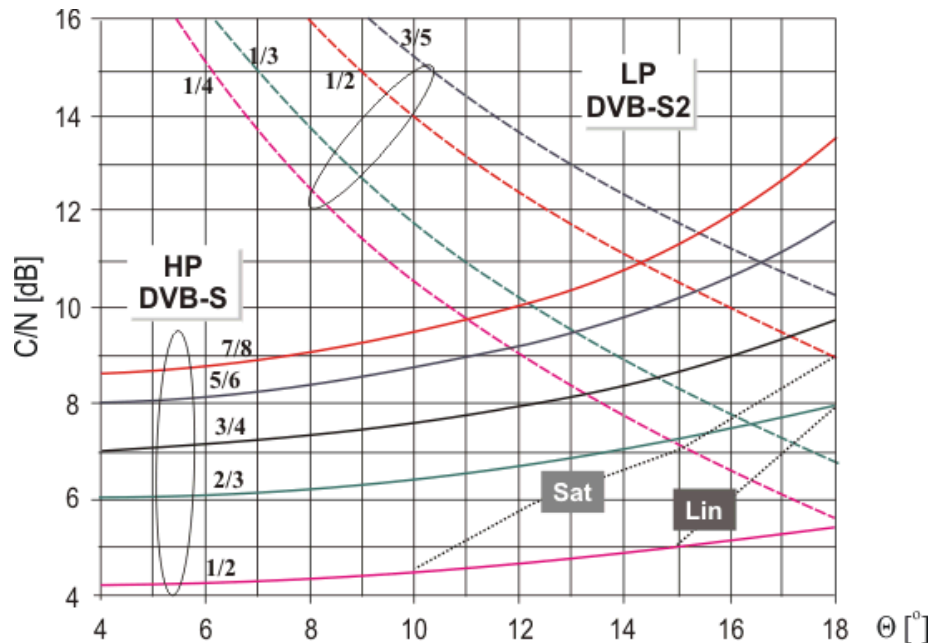


Рисунок 9 – Графіки порогових значень відношення сигнал-шум для ієрархічного способу модуляції

**Адаптивне кодування й модуляція** (АКМ) є ще однією особливістю DVB-S2. Такий режим роботи передбачено для з'єднання класу "точка-точка" (двоточкові послуги, наприклад, IP мовлення за однією адресою або DSNG). Суть режиму АКМ полягає у тому, що в залежності від умов приймання сигналу (наприклад, наявності дощу), змінюють режим роботи модулятора DVB-S2, тобто змінюють швидкість кодування ( $SR$ ) і формат модуляції, внаслідок чого змінюється і реальне значення  $C/N$  сигналу на вході абонентського приймача.

Тобто, режим АКМ дозволяє досягати максимальної можливої швидкості цифрового потоку за будь-яких погодних умов. Рівень  $C/N$  для сигналу на вході приймача встановлюють на за результатами безперервного вимірювання  $C/(N + I)$  (відношення «носійна/шум + завада») і передавання виміряного значення на наземну передавальну станцію супутникової системи через зворотний канал (рис.10). Параметри кодування й модуляції може бути змінено навіть від кадру до кадру.

Щоб уникнути переповнення буферів даних транспондера прийнятою інформацією під час поганих умов приймання (доводиться зменшувати  $SR$ ), застосовують механізм управління швидкостями інформаційних потоків. Тобто, здійснюють автоматичну адаптацію корисного трафіку до фізичних можливос-

тей каналу. Критичною проблемою в системах АКМ є часова затримка в петлі адаптації фізичного рівня, оскільки це безпосередньо пов'язано з системною можливістю відстежувати зміни стану каналу. Так, значні часові затримки можуть призводити або до втрати деяких кадрів у разі різкого погіршення проходження сигналу, або до втрати потенційної пропускної спроможності каналу. Штучне збільшення захисного порогу спрацьовування системи АКМ (за аналогією з АРУ) може призвести до економічної недоцільності її використання.

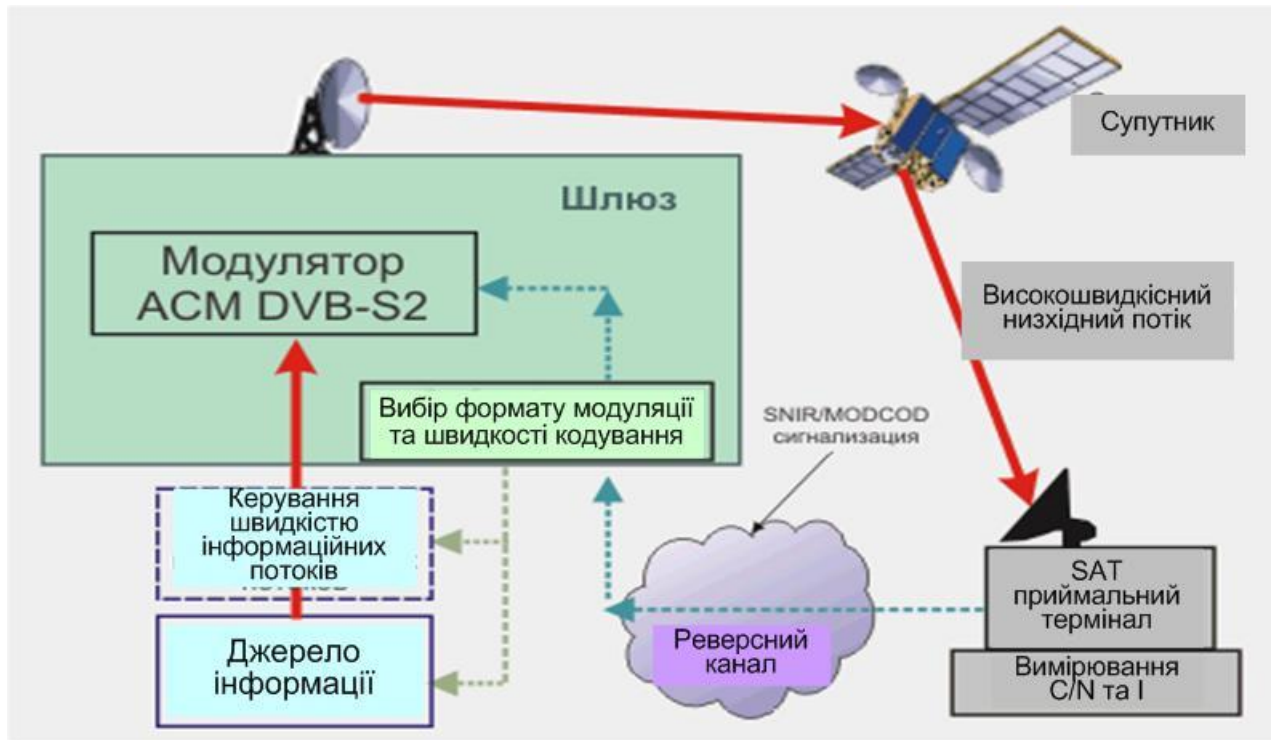


Рисунок 10 – Архітектура системи з адаптивною модуляцією

Відзначимо, що механізм роботи системи АКМ досить складний, особливо на рівні підсистеми для підтримки АКМ з транспортного потоку MPEG-TS (наприклад, мультиплексування аудіо, відео, мультимедіа та IP потоків з CBR і VBR), де здійснюється додавання і видалення нульових пакетів з формуванням CBR (TS з постійною швидкістю - Constant Bit Rate). Але, не дивлячись на всю складність системи АКМ, залежно від параметрів лінії зв'язку і її конфігурації, вона дозволяє збільшити пропускну здатність каналу до 200% в порівнянні із системою CCM (Constant Coding and Modulation – фіксоване кодування та модуляція).

### ***Порівняльні експлуатаційні характеристики систем DVB-S і DVB-S2.***

DVB-S2 забезпечує високу продуктивність, наближаючись до межі Шеннона, теоретичної максимальної швидкості передавання інформації в каналі із заданим рівнем шуму. Дана система може функціонувати за різними відношеннями сигнал/шум у каналі передавання від -2 дБ (тобто нижче рівня шуму) з ФМ-4 (QPSK) до +16 дБ у разі використання АФМ-32 (32APSK).

У табл. 1 наведено порівняльні характеристики систем DVB-S2 й DVB-S, які дозволяють оцінити підвищення продуктивності системи DVB-S2.

За типових параметрів ТВ мовлення виграш у швидкості передавання корисної інформації складає більш ніж 30% у кожному випадку.

Таблиця 1 – Приклад порівняння DVB-S і DVB-S2 для телевізійного мовлення

Ефективна ізотропно-випромінювана потужність транспондера, дБВт	51		53,7	
Система	DVB-S	DVB-S2	DVB-S	DVB-S2
Модуляція та кодування	QPSK 2/3	QPSK 3/4	QPSK 7/8	8PSK 2/3
Символьна швидкість, Мбод/с	27,5 ( $\alpha = 0,35$ )	30,9 ( $\alpha = 0,2$ )	27,5 ( $\alpha = 0,35$ )	29,7 ( $\alpha = 0,25$ )
C/N (в частотній смузі 27,5 МГц), дБ	5,1	5,1	7,8	7,8
Швидкість передавання корисних даних, Мбіт/с	33,8	46 (виграш = 36%)	44,4	58,8 (виграш = 32%)
Кількість ТВ програм стандартної роздільної здатності	7 MPEG-2 15 AVC	10 MPEG-2 21 AVC	10 MPEG-2 20 AVC	13 MPEG-2 26 AVC
Кількість ТВ програм високої роздільної здатності	1-2 MPEG-2 3-4 AVC	2 MPEG-2 5 AVC	2 MPEG-2 5 AVC	3 MPEG-2 6 AVC

## Лекція 7

### **СИСТЕМА ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ. СТАНДАРТ DVB-C**

*Навчальні питання:*

- 1. Загальна характеристика стандарту DVB-C*
- 2. Основні характеристики стандарту DVB-C*
- 3. Перспективи застосування стандарту DVB-C*
- 4. Приклади DVB-C модуляторів*

#### **1. Загальна характеристика стандарту DVB-C**

Стандарт DVB-C було розроблено міжнародною організацією DVB Project (Digital Video Broadcasting Project - проект цифрового відео радіомовлення).

DVB Project – це міжнародна організація, створена для розроблення стандартів у галузі цифрового телебачення для Європи. Її було створено в 1993р. Членами цієї організації на тепер є понад 300 компаній, що виробляють обладнання для телевізійного мовлення, що за забезпечують функціонування систем телевізійного мовлення та зв'язку, науково-дослідних організацій тощо. Штаб-квартира DVB Project знаходиться в Женеві (Швейцарія). Нагадаємо, що штаб-квартира європейського комітету з електротехнічної стандартизації (CENELEC) також знаходиться в Женеві. Стандарти, підготовлені DVB Project, потім подають на затвердження в європейські організації зі стандартизації. Ухвалення стандартів дозволяє уніфікувати засоби телевізійного мовлення, елементну базу телевізійних приймачів та іншої апаратури. Стандартизація є необхідною умовою успішного впровадження цифрового телебачення.

У результаті роботи DVB Project вже в 1994р. були вироблені основні положення стандарту DVB-C (C – Cable – кабель, тобто стандарт цифрового кабельного телебачення), і стандарту DVB-S (S – Sattelite – супутник, тобто стандарт супутникового цифрового телевізійного мовлення). Роботу над стандартом наземного (тобто звичайного, ефірного) телевізійного мовлення DVB-T (Terrestrial – наземний), була закінчено пізніше, в 1996 році, тому що під час розроблення системи для наземного мовлення довелося долати найбільш складні проблеми.

Стандарт містить параметри, характеристики та принципи функціонування системи DVB-C [1]. Основою для формування цифрових сигнальних потоків у всіх специфікаціях стандарту DVB першого покоління (в тому числі і стандарту DVB-C) є стандарт кодування рухомих зображень і звукового супроводу MPEG-2. Режими й параметри (рівні та набори параметрів – профілі) MPEG-2

наведено табл.1. Найбільшого поширення набув основний профіль (фіксований набір параметрів для налаштування) цього стандарту без масштабування.

Рівень High-1440 (1440×1152 елементів) призначено для телебачення високої роздільної здатності (високої чіткості) з форматом екрану 4:3 (стандартний екран), а рівень High (1920×1152 елементів) – для телебачення високої роздільної здатності (HDTV) з форматом екрану 16:9 (широкоформатне зображення).

У термінології для опису системи стиснення MPEG-2 застосовано терміни «рівень» та «профіль».

*Профіль (profile)* є фіксованим набором параметрів, що визначає процедури оброблення сигналів для обраного режиму.

*Рівень (level)* – характеристика, що визначає роздільну здатність зображення для якого здійснюють стиснення відеопотоку.

Таблиця 1 – Режими та параметри стандарту MPEG-2

Рівень (формат зображення)	Профіль (структура стисненого зображення)				
	<i>Простий (Simple)</i>	<i>Основний (Main)</i>	<i>Масштабований за S/N (SNR Scalable)</i>	<i>З просторовим масштабуванням (Spatially Scalable)</i>	<i>Високий (High)</i>
High 1920×1152	-	80 Мбіт/с	-	-	100 Мбіт/с
High-1440 1440×1152	-	60 Мбіт/с	-	60 Мбіт/с	80 Мбіт/с
Main 720×576	15 Мбіт/с	15 Мбіт/с	15 Мбіт/с	-	20 Мбіт/с
Low 352×280	-	4 Мбіт/с	4 Мбіт/с	-	-
Кодування компонентів	4:2:0	4:2:0	4:2:0	4:2:0	4:2:0 або 4:2:2
В-кадри	Нема	Є	Є	Є	
Масштабованість	Нема	Нема	За відношенням S/N	За просторовою роздільною здатністю та відношенням S/N	За просторовою роздільною здатністю та відношенням S/N

У табл.1 і профілі і рівні упорядковано за зростанням складності процесу стиснення. З переходом на більш складні профілі, тобто у разі просування по таблиці праворуч, збільшується кількість використаних методів кодування, а також з'являються нові властивості цифрової телевізійної системи, що призводить ускладнення апаратури та алгоритмів оброблення сигналів. Як впливає з табл.1, у разі застосування головного рівня (Main), що призначений для стиснення телевізійного зображення звичайної роздільної здатності, швидкість передавання двійкових символів в каналі зв'язку досягає 15 Мбіт/с. Якщо порівняти це значення з початковим значенням інтенсивності не стисненого відеопотоку 216 Мбіт/с, що відповідає паралельному цифровому телевізійному інтерфейсу (стику), параметри якого обумовлено Рекомендацією 601 МККР (ITU-



R), можна зробити висновок, що стиснення сигнального потоку відбувається приблизно в 15 разів.

Режим «Головний профіль – головний рівень», що англійською записують як "Main Profile @ Main Level або скорочено MP @ ML" на тепер широко використовують у системах DVB і зокрема DVB-C для передавання цифрових зображень звичайної чіткості.

На більш високих рівнях головного профілю, призначених ТВЧ (HDTV), швидкість передавання сигналів у каналі зв'язку зростає до 60 або 80 Мбіт/с. Слід підкреслити, що для всіх рівнів роздільної здатності даного профілю використовують однаковий набір методів кодування. Такий підхід обумовлює сумісність різних рівнів.

Для забезпечення більш високих рівнів стиснення кодери і декодери повинні мати більшу швидкодію і більший обсяг пам'яті. Апаратура вищих рівнів роздільної здатності може функціонувати й на більш низьких рівнях роздільної здатності.

Вищі профілі стандарту MPEG-2 мають режим масштабування зображень та якості їх відтворення. Під час реалізації вищих профілів можливо застосувати компонентне кодування сигналів не тільки через рядок (4: 2: 0), а й у кожному рядку (4: 2: 2). Передбачено також спеціальний профіль (4: 2: 2, в табл.1 не наведено), призначений для студійного застосування, зокрема для відеомонтажу.

### ***Особливості передавання цифрових сигналів мережами кабельного телебачення***

Впровадження цифрового телебачення у системи кабельного телебачення (СКТ) обумовило в більшості випадків необхідність здійснювати заміну мережного обладнання, а також самих кабельних ліній.

Оскільки середовище розповсюдження електромагнітних хвиль у кабельних мережах добре захищене від впливу зовнішніх електромагнітних завад є можливість використовувати багатопозиційну модуляцію для передавання цифрових сигналів. Саме тому у кабельних лініях, побудованих з використанням коаксіальних кабелів використовують багатопозиційну квадратурну амплітудну модуляцію КАМ (QAM – Quadrature Amplitude Modulation).

Велике значення  $S/N$  згідно теореми Шеннона обумовлює зменшення ймовірність помилок, що характеризують коефіцієнтом помилкових бітів КПБ (англійсько  $BER$  – Bit Error Rate – кількість помилкових бітів). За таких умов у системі кабельного цифрового телебачення DVB-C запропоновано застосовувати лише один вид завадостійкого кодування. Однак пакетні помилки все ж можуть виникати, тому перемежування залишається обов'язковою складовою процесу завадостійкого кодування.

Цифрові сигнали є менш чутливими до інтермодуляційних спотворень порівняно з аналоговими сигналами, тому для забезпечення якісного передавання цифрових сигналів кабельною лінією можна використовувати значно

менше значення захисного відношення «цифровий сигнал/цифрова завада» ( $S/D$ ) в суміщеному та сусідніх каналах.

Відзначимо, що цифрові квадратурно-модульовані сигнали чутливі до амплітудних і особливо фазових спотворень у передавальному тракті, тому слід приділяти особливу увагу питанням узгодження передавальних ліній та корекції передавальної характеристики.

Завдяки ефективному стисненню, в одному стандартному частотному каналі 8 або 7 МГц можна передавати 4-6 ТВ програм звичайної телевізійної чіткості стандартної якості. Збільшення ефективності використання частотних каналів надає можливість активно використовувати частотні ресурси кабельної мережі для передавання цифрових сигнальних потоків інших телекомунікаційних послуг.

Перехід на цифровий формат призводить до зміни архітектури головних станцій кабельної мережі (ГС). Для формування програмних мультиплексів із сигналів прийнятих з супутника, каналу на земного телебачення або безпосередньо з телевізійної студії нема необхідності здійснювати повне декодування окремих телевізійних програм. Багатопрограмні цифрові сигнали можна формувати шляхом виділення певних програмних потоків, що надходять у транспортному потоці MPEG-2.

Також на рівні транспортного потоку можна вирішувати питання шифрування та зміни системи умовного доступу.

Прийнятий у стандартах DVB наземного, супутникового та кабельного телебачення єдиний підхід до каналного кодування істотно полегшує оброблення й перетворення сигналів DVB для передавання телевізійних програм різними засобами. За принципами формування сигналу цифрового телебачення стандарт DVB-C досить близький до супутникового стандарту DVB-S.

## **2. Основні характеристики стандарту DVB-C**

Структура системи DVB-C (Стандарт DVB-C) максимально гармонізована зі структурою супутникової системи DVB-S, але в використано інший тип модуляції – M-QAM (M – кратність модуляції) на відміну ФМ-4 (QPSK), що застосовано у супутниковій системі. M – число позицій M від 16 до 256 (тобто від 16-QAM до 256-QAM), що може набувати вектор QAM модульованого сигналу на площині векторної діаграми. На рис.1 наведено структуру обладнання передавально-приймального тракту системи цифрового кабельного телебачення.

Розглянемо послідовність процедур, які передбачено здійснювати над цифровим сигнальним потоком у системі цифрового кабельного телебачення DVB-C.

Вхідними сигналами для формування програмних потоків на головній станції є транспортні пакети MPEG-2 і сигнали тактової синхронізації, що надходять від: супутникової лінії, технологічних ліній, локальних програмних джерел тощо.

Методи інверсії кожного восьмого байта для циклової синхронізації, рандомізація, перемежування та кодування *RS*-кодом такі самі що й аналогічні методи і пристрої у системах DVB-S та DVB-T.

Перетворювач байтів у кортежі (короткі послідовності бітів, що дорівнюють розмірності модуляційного коду) здійснює формування бітових структур, необхідних для подальшого отримання символів КАМ. Після згорткового перемежування безперервну послідовність байтів необхідно розділити на короткі послідовності бітів, кожна з яких відповідає символу QAM, тобто певній точці на векторній діаграмі модульованого сигналу. Такі послідовності двійкових символів називаються кортежами. Довжина кортежу

$$m = \log_2 (M),$$

де  $M$  - число можливих позицій сигналу  $M$  - КАМ (тобто  $2^m$  - QAM).

З метою підвищити надійність передавання цифрових КАМ модульованих сигналів застосовано диференційне кодування. Це кодування застосовано до двох старших розрядів кожного символу КАМ.

Далі здійснюють узгоджену фільтрацію для формування спектра в квадратурних каналах  $I$  та  $Q$  (найквістове фільтрування). Сигналами  $I$  та  $Q$  модулюють квадратурні носійні коливання й переносять спектр КАМ модульованого сигналу у робочу смугу відповідного кабельного каналу із застосуванням відповідного фізичного інтерфейсу. Під час приймання сигналу цифрового здійснюють зворотні операції у відповідному порядку.

Характерною особливістю розглянутого тракту адаптації до каналу є відсутність внутрішнього згорткового кодека і наявність процедури формування спектру в основній смузі.

Захист від пакетованих помилок у системі DVB-S здійснюють тільки за рахунок перемежування на виході кодера Ріда-Соломона.

Циклічний алгоритм перетворення байтів у кортежі для одного циклу може бути подано формулою:

$$8k = n \times m,$$

де:  $k$  – кількість перетворених байтів (по 8 біт);

$n$  - кількість кортежів задовжки  $m$  біт.

Для різних варіантів модуляції  $M$ -КАМ (QAM) зазначені коефіцієнти набувають різних значень. Їх наведено у табл.2.

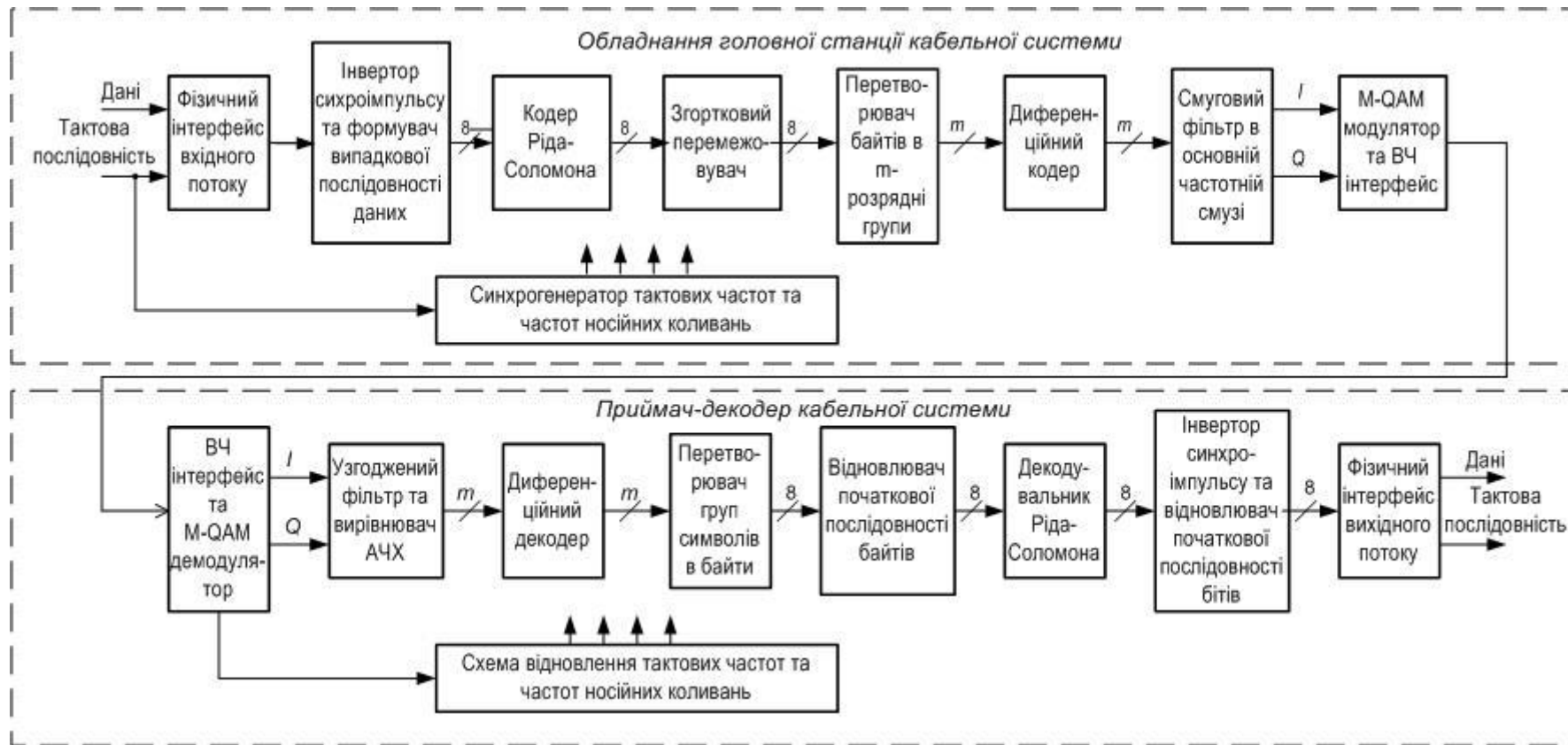


Рисунок 1 – Структурна схема системи DVB-C

Таблиця 2

Модуляція	m	n		$8k = n \cdot m$
16QAM	4	2		8
32QAM	5	8		40
64QAM	6	4		24
128QAM	7	8		56
256QAM	8	11		8

Мінімальний цикл перетворення прийнятих кортежів у ціле число байтів має місце у разі модуляції 16-QAM і 256-QAM. Окремо можна відзначити, у разі 256-QAM байти і кортежі співпадають.

У табл.3 наведено приклади розрахункових значень символної та інформаційної швидкості за різних кратностей модуляції в каналі зі смугою 8 МГц. Максимальна швидкість набуває значення 38,1 Мбіт/с, що відповідає пропускній здатності стовбура супутникового ретранслятора зі смугою 33 МГц у типовому режимі:  $F_{\text{симв}} = 27,5$  Мсимв/с, за швидкості загорткового коду  $CR = 3/4$ .

### *Перспективи застосування стандарту DVB-C*

У разі впровадження стандарту DVB-C досягають таких позитивних результатів:

- істотна економія частотного ресурсу. Дійсно, якщо в одному фізичному каналі можна розмістити 4-8 ТВ програм, то це означає, що для передавання 60-ти програм потрібно всього близько 10-ти каналів. Такий частотний вииграш особливо відчутний у разі впровадження стандарту DVB-C на застарілих мережах з пропускною здатністю до 240 ... 300 МГц. У таких мережах тепер можна розмістити понад 100 цифрових каналів, а в разі активізації реверсного каналу – ще й послуги інтерактивного сервісу;

- істотно підвищується якість трансльованих програм. Дійсно, трансляція аналогових сигналів неминуче супроводжується зниженням їх якості через накопичення спотворень під час поширення через середовище розповсюдження (шуми, інтермодуляційні спотворення, фонові завади, крос-модуляція). Цифрові ж сигнали (DVB-C) зберігають свою якість незалежно від протяжності магістралі. Для них достатньо забезпечити значення  $C/N$ , що перевищує порогове значення для обраного режиму модуляції;

- у разі застосування стандарту DVB-C є можливість значно збільшити зону обслуговування СКТ за рахунок більш низького шумового порогового (не більше 36

дБ). Розрахунки показують, що у разі використання стандарту DVB-C можна збільшити зону обслуговування в 10 і більше разів за тої ж потужності передавачів головної станції. Таке збільшення зони охоплення є найбільш ефективним саме на застарілих мережах з верхньою частотою 240 ... 300 МГц. На таких частотах погонні втрати коаксіального кабелю майже в 2 рази менше, ніж на частоті 862 МГц, на яку проектують сучасні СКТ. У разі менших погонних втрат потрібно меншу кількість підсилювачів, що й гарантує підтримку високого значення  $S/N$  на всіх лініях мережі. Зменшення числа фізичних каналів знижує енергетичне навантаження самої СКТ, що еквівалентно значному поліпшенню  $S/N$ ;

Таблиця 3


Корисна інформаційна швидкість (транспортний рівень MPEG-2), Мбіт/с	Загальна швидкість з кодом RS (204, 188), Мбіт/с	Кабельна символна швидкість, Мбод/с	Необхідна смуга частот, МГц	Вид модуляції
38,1	41,34	6,89	7,92	М 64QA
31,9	34,61	6,92	7,96	М 32QA
25,3	27,34	6,84	7,86	М 16QA
18,9	20,52	3,42	3,93	М 64QA
16	17,4	3,48	4	М 32QA
12,8	13,92	3,48	4	М 16QA
9,6	10,44	1,74	2	М 64QA
8	8,7	1,74	2	М 32QA
6,4	6,96	1,74	2	М 16QA

– з'являється можливість ефективного кодування пакетів програм для застосування системи обумовленого доступу, що дозволяє операторам СКТ отримувати додаткові прибутки за рахунок формування платних каналів.

### *Приклади DVB-C модуляторів*

Прикладом DVB-C модулятора (див. фото) є модуль DVQ 90 з DVB-ASI входом (Teleste, Фінляндія). Такий модуль встановлюють у складі головної станції DVX.

Цей DVB-C модуль функціонує у повному діапазоні вхідних/вихідних ASI швидкостей (0 ... 213,7 Мбіт/с) зі стандартними розмірами пакетів (188/204 байт). Власне DVB-C модулятор має такі основні параметри:

	Модуляційні сузір'я	16,32,64,128,256 QAM
	Символьна швидкість	2...7 Мсимв/с (крок 0,001 Мсимв/с)
	Коефіцієнт округлення канального фільтра ( <i>Roll-off</i> )	12%, 15%, 18%
	Амплитудне розбалансування	0%
	Фазова помилка	0°
	Фазовий джитер	≤ 0,5°
	Ослаблення носійної частоти	≥ 55 дБ
	Відношення нносійна/шум ( <i>SNR</i> )	≥ 43 дБ
	Рівень паразитних носійних коливань (в тому числі і для синусоїдальної носійної)	-65 дБс
	Діапазон вихідних частот	47...862 МГц
	Стабільність вихідного рівня	≤ 1 дБ
	Точність установлення вихідного рівня	±1 дБ
	Пульсації АЧХ	≤ 0,4 дБ

Іншим прикладом можуть бути модулі DVQ91х, для яких вхідним сигналом є супутникові канали з цифровим ФМ-4 модульованим сигналом згідно стандарту DVB-S в діапазоні частот 950 - 2150 МГц і рівнями 44 ... 84 дБмкВ (75 Ом). Модуль також має DVB-ASI вхід і вихід, тобто є ідентичним до вище розглянутого модуля DVQ90х.

## Лекція 8

### СИСТЕМА ЦИФРОВОГО КАБЕЛЬНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ DVB-C2

*Навчальні питання:*

1. Загальна характеристика DVB-C2.
2. Концепція логічного інформаційного каналу
3. Формування QAM-символів і завадостійке кодування
4. Робочі характеристики DVB-C2

#### 1. Загальна характеристика DVB-C2

Завдяки хорошим фізичним характеристикам, гібридні оптико-коаксіальні мережі (**HFC – Hybrid Fiber Coax**) є якісною платформою для сьогоденних і завтрашніх широкосмугових телекомунікаційних послуг. У минулому їх транспортний спектр використовували, в основному, для передавання сигналів аналогових ТВ-каналів. В останні роки впровадження DVB-C в поєднанні з компресією MPEG-2 дозволило передавати такою мережею сигнали великої кількості цифрових ТВ-каналів. У той же час DVB-C, як правило, продовжує співіснувати з системами аналогового мовлення, і до того ж у багатьох HFC-мережах присутня двостороннє передавання даних. Оператори формують у себе пакет мультисервісних послуг **Triple Play** (надання одним оператором послуг телефонії, доступу до Інтернет та цифрового телебачення). Обсяги IP-трафіку стрімко зростають, і ця тенденція обіцяє зберегтися в майбутньому. Крім того, все більші обсяги відеоматеріалів передають у форматі ТВЧ (телебачення високої чіткості), що вимагає значно більшої пропускної здатності в порівнянні з телебаченням стандартної чіткості. Згадаймо також, що частотна смуга прямого каналу в кабельній мережі часто обмежена 800 МГц.

За результатами дослідження, проведеного в межах проекту **ReDeSign**, через зазначені вище чинники багато кабельних операторів незабаром зіткнуться з проблемою дефіциту спектра. Вирішити цю проблему можна або розширенням спектра, або поділом мережі на сегменти з меншим числом абонентів. Обидва підходи вимагають застосування великої кількості активних і пасивних мережних компонентів, тобто є досить затратними для оператора. Третій, найбільш перспективний підхід – реорганізація фізичного каналу за технологією з більш ефективним використанням спектра. Саме таку технологію розроблено в межах нещодавно прийнятого стандарту **DVB-C2**.

Друге покоління стандартів **DVB (DVB-X2)**, як і перше, містить три основні транспортні стандарти, які обслуговують три головні транспортні середовища – **DVB-S2** (супутниковий), **DVB-T2** (ефірний) і **DVB-C2** (кабельний).

Розробники сімейства стандартів DVB-X2 намагалися максимально уніфікувати компоненти стандартів, призначених для різних середовища. Зокрема, у всіх стандартах застосовано однакову схему завадостійкого кодування (FEC – Forward Error Correction). В цій схемі передбачено послідовне застосування зов-



нішнього захисного каналного коду Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема (Bose-Bhauhdhuri-Носсуенгема, BCH) і внутрішнього завадостійкого каналного коду з малою щільністю перевірок на парність (Low Density Parity Check Codes - LDPC). Крім того, системні рівні DVB-S2 й DVB-C2 є дуже подібними, що дозволяє легко конвертувати супутниковий сигнал у формат, передбачений для кабельних мереж.

На перший погляд може здатися дивним, що для DVB-C2 було обрано схему модуляції COFDM. Але в наступних розділах буде обґрунтовано переваги цього підходу.

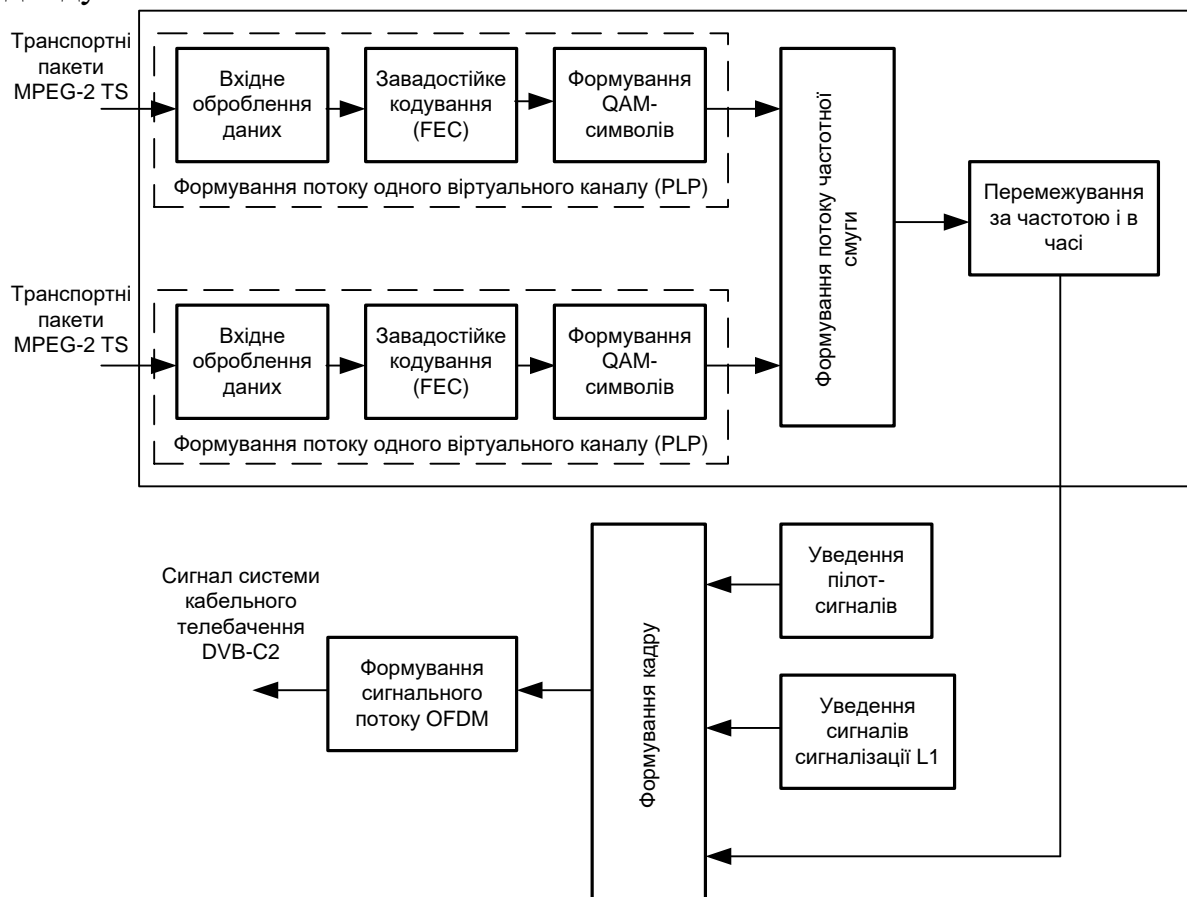


Рисунок 1 – Спрощена схема формування сигнального потоку в передавачі системи DVB-C2

На рис. 1 наведено спрощену структурну схему передавача DVB-C2. Так само, як в DVB-S2 і DVB-T2, в новому кабельному стандарті всередині одного фізичного каналу передбачено формування транспортних труб – віртуальних каналів фізичного рівня. Вони отримали назву Physical Layer Pipe (**PLP**, pipe – труба, програмний канал). PLP – це логічний канал, через який можна передавати звичайний потік MPEG-2 TS або використовуватися для передавання IP потоку із застосуванням протоколу Generic Stream Encapsulation (**GSE**).

Для кожного віртуального каналу (PLP) здійснюють вхідне оброблення сигнального потоку, після якого його пропускають через модуль завадостійкого кодування і далі – через розподільник QAM-символів. Один або кілька PLP можуть укладатися в так звані прошарки даних *Data Slices* (аналогічні каналам). Для підвищення стійкості до пакетних помилок або впливу вузькосмугових завад в цих прошарках здійснюють перемежування за часом і частотою. Після цього дані

прошарку надходять у формувач кадру, що збирає до купи всі прошарки і додає пілот-сигнали, а також преамбулу з сигналізацією першого рівня. На останньому етапі сформований кадр надходить в генератор OFDM-потoku.

## **2. Концепція логічного інформаційного каналу (PLP)**

Застосування PLP дозволяє передавати в одному фізичному каналі кілька незалежних логічних каналів. Кожен PLP є таким логічним каналом, яким передають або транспортні пакети MPEG-2 TS, або IP-пакети з використанням протоколу GSE.

Ідентифікатор *PLP Id*, що дозволяє ідентифікувати конкретний PLP на приймальній стороні, є частиною заголовка, що передають перед кожним пакетом. Після декодування цього заголовка і вилучення PLP Id приймач може визначити, чи має він декодувати цей пакет. Пакети, які не належать до даного PLP, не обробляють, тобто вони не надходять до QAM-демодулятора і декодера завадостійкого кодування. У результаті істотно знижується швидкість потоку, який обробляє приймач, а також необхідна процесорна потужність, необхідна для цієї обробки. Інша перевага застосування PLP полягає в тому, що різні потоки можна передавати з різним рівнем завадостійкості: схема модуляції і режим завадостійкого кодування для кожного PLP можна обирати індивідуально.

Тобто, кожній послuzі можна призначити певну якість обслуговування (Quality of Service, QoS). Переваги індивідуального вибору параметрів в першу чергу проявляються у разі двостороннього передавання даних в режимі точка-точка. параметри можна обирати залежно від характеристик каналів, що з'єднують передавальну станцію і конкретний абонентський пристрій, а саме залежно від протяжності лінії, кількості мережних підсилювачів і якості внутрішнього будинкового розведення комунікацій.

Таку технологію можна використати, наприклад, для послuzи доступу в Інтернет кабельною лінією із застосуванням накладеної технології DOCSIS. У такому разі для передавання в прямому напрямку використовують канал DVB-C2, а інформацію про якість сигналу може бути передано кабельним модемом через зворотний канал. Такий підхід дозволить підвищити ефективність використання частотного спектра мережі.

## **3. Формування QAM-символів і завадостійке кодування**

Як і для інших членів родини стандартів DVB-X2, у стандарті DVB-C2 передбачено те саме завадостійке кодування LDPC, яке раніше було закладено в стандарти DVB-T2 і DVB-S2. Коди цього класу відомі ще з 60-х років минулого століття, але їх практичне використання стало можливим лише останнім часом завдяки досягненням у сфері напівпровідникових технологій. Переваги застосування цих кодів можна проілюструвати наведеними нижче цифрами. Потік DVB-C2 з відносною швидкістю захисного коду 9/10 може бути відновлений декодером навіть у разі щільності помилок в кілька відсотків. У той час, як застосований в DVB-C код Ріда-Соломона за тієї ж відносної швидкості може відновити потік до

квазі безпомилкового стану у разі щільності помилок не більше  $2 \cdot 10^{-4}$ . Ефективність LDPC-кодування особливо висока у разі кодування довгих послідовностей. Тому, довжина стандартного слова, до якого в DVB-C2 застосовують LDPC, становить 64800 бітів (замість тисяча шістсот тридцять двох бітів або 204 Байтів у DVB-C). Тобто, кодують слова, які більше не корельовані з транспортним пакетом MPEG-2 TS.

Після LDPC в DVB-C2 передбачено застосування коду BCH, що характеризується дуже високою відносною швидкістю (близько 0,99). Цей код з малою коригувальною здатністю застосовують для зниження порога корекції LDPC. Поріг корекції має місце для всіх ітеративних схем кодування, таких як LDPC або турбокоди. Він обумовлений тим, що під час декодування завжди залишається деяка кількість помилок, які ускладнюють корекцію під час наступних ітерацій, здійснюваних декодером завадостійкого коду.

Істотне підвищення ефективності завадостійкого кодування дозволяє використовувати більш високі розмірності модуляції. Якщо в DVB-C максимально можна використовувати 256 QAM, то в DVB-C2 додано розмірності 1024 й 4096 QAM. Допустимі комбінації модуляцій і схем завадостійкого кодування наведено в табл. 1. У ній також наведено рівні відношення сигнал / шум, необхідні для приймання сигналів безпомилково. Ці рівні знаходяться в межах приблизно від 10 до 35 дБ, а множина допустимих варіантів схем модуляції та кодування дозволяє підбирати їх для реального значення відношення сигнал / шум з кроком близько 2 дБ.

Таблиця 1 – Допустимі в системі DVB-C2 комбінації модуляцій і відносних швидкостей передавання, а також рівні відношення сигнал / шум, необхідні для приймання сигналу без помилок

FEC	16 QAM	64 QAM	256 QAM	1024 QAM	4096 QAM
2/3	-	13,5 дБ	-	-	-
3/4	-	-	20,0 дБ	24,8 дБ	-
4/5	10,7 дБ	16,1 дБ	-	-	-
5/6	-	-	22,0 дБ	27,2 дБ	32,4 дБ
9/10	12,8 дБ	18,5 дБ	24,0 дБ	29,5 дБ	35,0 дБ

### ***Застосування OFDM в DVB-C2***

Основною відмінністю DVB-C2 від DVB-C є застосування OFDM [10] замість однієї QAM-модульованої носійної частоти. Завдяки добре відомій, перевірній на практиці стійкості до різних видів каналних спотворень (наприклад, обумовлених багатопроблемним розповсюдженням або вузькосмуговими завадами), OFDM застосовують у більшості сучасних одно- і двобічно спрямованих технологій передавання сигнальних потоків. Що стосується родини стандартів DVB, то OFDM спочатку було запроваджено в ефірному стандарті першого покоління DVB-T, а потім його параметри розширили і вдосконалили в стандарті DVB-T2. Набір COFDM-параметрів, використаний в новому ефірному стандарті, є цілком відповідним до вимог передавання в кабельній лінії, тому його було запроваджено

також і в DVB-C2. Завдяки спільним COFDM-параметрам і значній кількості інших загальних блоків створення спеціалізованих мікросхем, що поєднують функціональність ефірного та кабельного стандартів, не призведе до істотної надмірності в порівнянні з одностандартними мікросхемами.

Як наслідок, DVB-C2 підтримує запозичений в DVB-T2 режим 4K з тривалістю корисного OFDM-символу 448 мкс і двома варіантами захисних інтервалів – 1/64 і 1/128. Більш того, в DVB-C2 використовують ті ж схеми розподілу пілот-сигналів, що дозволяє застосовувати в обох системах один блок оцінювання якості каналу.

У той же час, на відміну від ефірного стандарту, систему DVB-C2 не треба було розраховувати на частотну сітку радіоканалів, подібно до ефірного телебачення. Оскільки кабельна мережа є закритим екранованим середовищем, то немає необхідності координувати використання її частотного спектра з ефірними радіоканалами. Навпаки, можна гнучко адаптувати частотну смугу кабельного каналу до конкретних практичних потреб. Застосування OFDM замість однієї модульованої носійної частоти саме і є ключовим чинником, що забезпечує цю можливість. Ширину каналу задають виділенням йому певної кількості OFDM-носійних частот. У той же час характеристики вхідного фільтра та системний годинник залишаються практично незмінними. Такий підхід дозволяє розширити частотну смугу передавання сигналу для забезпечення більшої кількості послуг. Щоб не ускладнювати і не здорожувати абонентське обладнання, передбачено сегментоване приймання таких каналів. Цей підхід вже попередньо було використано в японській системі ефірного телебачення ISDB-T.

Структуру кадру DVB-C2 наведено на рис. 2.

Приймач зі стандартною смугою пропускання може витягти із широкого пакета тільки ту частину, яка містить сигнали послуги, що необхідно приймати в даний момент, а смуга частот, яку використовують для передавання цих сигналів, ніколи не перевищує 8 МГц. Кожен кадр C2 починається з преамбули, що складається з одного або більше OFDM-символів і її призначено для забезпечення двох основних функцій. З одного боку, вона забезпечує надійну часову і частотну синхронізацію OFDM-сигналу і самої структури кадру. З цією метою в преамбулу уведено особливу послідовність пілот-сигналів, що модулюють кожну шосту OFDM-носійну символів преамбули. З іншого боку, преамбула містить сигнали сигналізації 1-го рівня (**L1**), необхідну для декодування потоків даних.

Преамбула складається з блоків сигналізації **L1**, які циклічно передають в кожній смузі частот завширшки 7,61 МГц, з яких складається загальний широкий канал. Фіксоване розташування блоків **L1** і їх повторення з кроком 7,61 МГц забезпечують їх приймання під час налаштування тюнера на будь-які 8 МГц із виділеного для кадру частотного діапазону. Як наведено на рис. 3, у разі переходу до частотного подання сигналу (тобто після прямого перетворення Фур'є) приймач має можливість розмістити отримані ним сигнали, перенесені кожною носійною, в потрібному порядку і відновити всю структуру кадру. Структуру кадру DVB-C2 наведено на рис. 2.

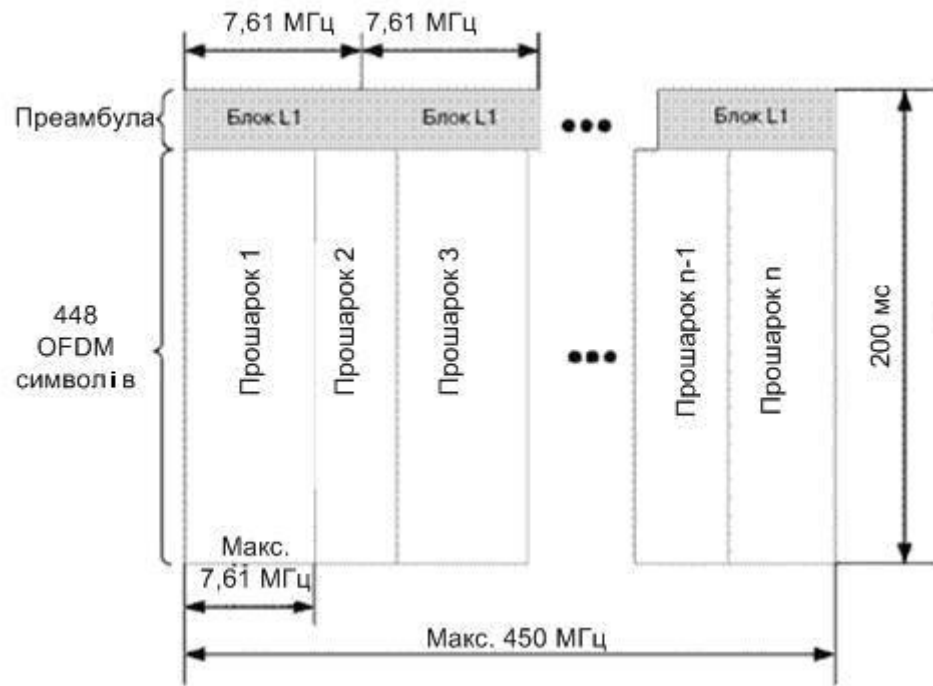


Рисунок 2 – Структура кадру DVB-C2 у частотно-часовій області

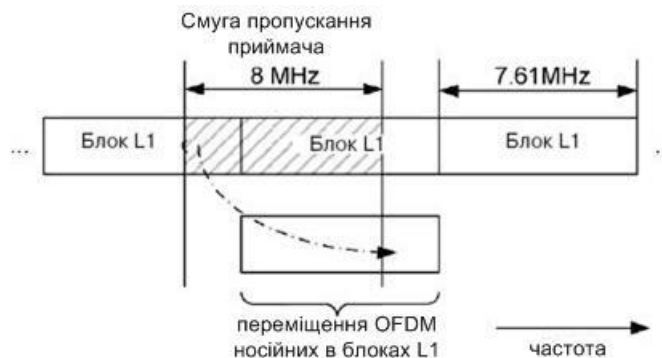


Рисунок 3 – Структура преамбули кадру DVB-C2. Схема зчитування преамбули шляхом переміщення OFDM носійних в блоках L1

Зазначимо, що навіть втрата кількох носійних помітно не вплине на роботу системи, оскільки сигнали сигналізації передають в дуже стійкому режимі. На відміну від блоків сигналізації **L1**, окремі сигнальні прошарки не треба обов'язково вписувати в жорстку частотну сітку. Їх можна розташовувати всередині загального потоку абсолютно довільно. Єдина вимога – щоб жоден прошарок не перевищував 7,61 МГц. Саме тому частотна смуга сигналізації **L1** має бути доступною під час налаштування будь-якого частотного сегменту вхідного потоку завширшки 8 МГц.

Така схема дозволяє точно налаштувати відведену для прошарку частотну смугу з урахуванням швидкості передавання в ньому сигнального потоку. Наприклад, супутникові потоки з дуже різними бітовими швидкостями можна перенести в потік DVB-C2 без необхідності резервувати зайве місце службовими (стафінговими) бітами або здійснювати повторне перетворення (ремультіплексування) транспортного потоку MPEG-2 TS. Прошарок можна формувати доти, допоки

не буде заповнено всі носійні OFDM-сигналу в межах частотної смуги 8 МГц. Розміщення і ширина кожного прошарку може змінюватись від кадру до кадру, але це не тягне за собою необхідності перебудовувати приймач. Сигналізація в блоках **LI** містить не тільки початкову і кінцеву частоту прошарків, на які поділено кадр, але також і оптимальну частоту налаштування для приймання цього прошарку. Тобто передавач може змінювати параметри прошарків від кадру до кадру в межах заданої йому приймальної смуги.

#### 4. Робочі характеристики системи DVB-C2

Специфікація DVB-C2 регламентує певні характеристики кабельних мереж. Під час їх розроблення брали до уваги вже згадані вимоги простоти ретрансляції супутникових сигналів і можливість адаптивно вибирати стійкість з'єднання для персоніфікованих послуг (точка-точка). Крім того, в кабельних мережах використовують екрановане середовище передавання сигналів, що дозволяє використовувати весь можливий частотний спектр, наприклад до 862 МГц, і не застосовувати жорстку частотну сітку частотних смуг, визначену для ефірних трансляцій.

##### *Засоби підвищення ефективності використання спектра*

Одна з основних цілей розроблення специфікації DVB-C2 полягає, зрозуміло, в підвищенні ефективності використання спектра. Це досягнуто застосуванням **LDCP-кодування** в поєднанні з більш багаторівневими схемами QAM-модуляції, а також за рахунок застосування OFDM.

Порівняльні характеристики частотних каналів (АЧХ), що дозволяють зрозуміти чинники, за рахунок яких OFDM обумовлює можливість збільшити частотну ефективність, наведено на рис. 4.

У стандарті DVB-C з його одночастотною модуляцією застосовано маску фільтру, що задає форму АЧХ частотного каналу. У результаті дії такого фільтра (фільтра округлення спадної частини АЧХ) АЧХ на краях каналу має спадні ділянки (скоси) певної форми. Ці спадні частини характеризують коефіцієнтом заокруглення.

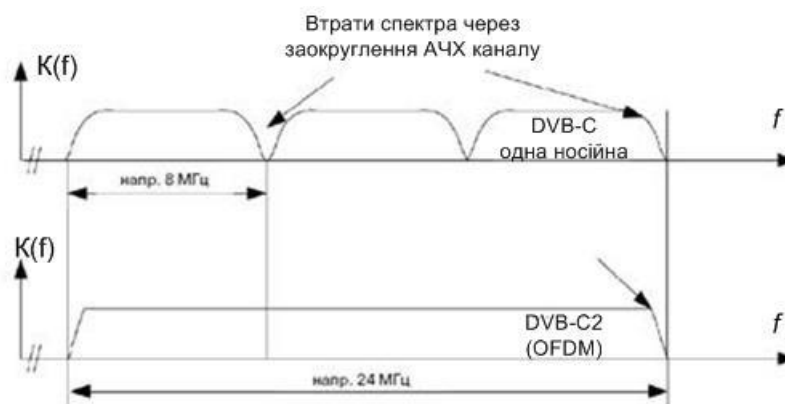


Рисунок 4 – Амплітудно-частотні характеристики радіочастотних каналів DVB-C та DVB-C2

У DVB-C застосовують фільтри з коефіцієнтом заокруглення 0,15, і на цю ж величину знижується ефективність використання спектра. Можливо застосовувати фільтри з меншим коефіцієнтом, але це зажадає призводить до необхідності більш високої точності налаштувань передавача і приймачів. Треба відзначити, що цей фактор не залежить від абсолютної ширини каналу, тобто для каналу, скажімо, завширшки 16 МГц спектральні втрати через заокруглення будуть такими ж. Але у випадку з OFDM це не так. Тут втрати пов'язані з додаванням захисного інтервалу, введенням пілот-сигналів і захисних частотних смуг на краях спектру.

У стандартному режимі з захисним інтервалом 1/128 і щільністю розміщення пілот-сигналів 1/96 втрати, зумовлені цими двома факторами, складають приблизно 2%. Що стосується захисних частотних смуг на краях смуги частотного каналу, то вони потрібні тільки між сусідніми каналами, але не всередині одного OFDM-поток. І, як можна бачити на рис. 5, ширина прикордонної захисної смуги практично не залежить від ширини смуги, в якій розташовано сам OFDM-сигнал.

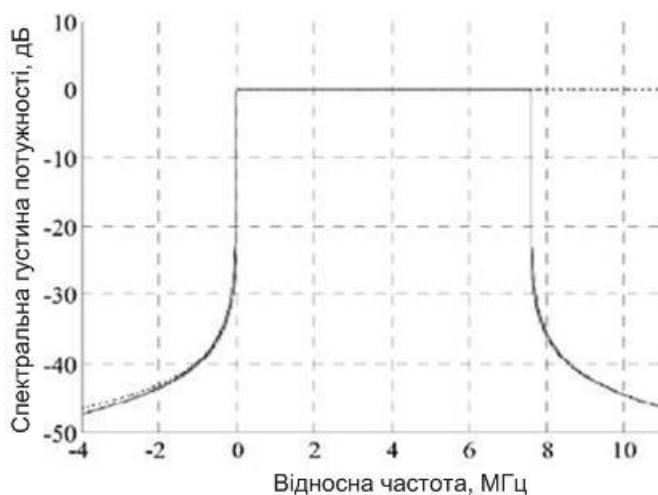


Рисунок 5 – Ідеальний графік спектральної щільності сигналу DVB-C2 з захисним інтервалом 1/128 за ширини сигнального про шарку 7,61 МГц та 450 МГц. Перша активна носійна розташована на відносній частоті 0 МГц

Графіки спектральної щільності ідеальних сигналів DVB-C для ширини частотної смуги 7,61 і 450 МГц на граничній частоті практично накладаються один на другий. Тобто для обох сигналів достатньо захисної смуги завширшки приблизно в 200 кГц. Таким чином, з розширенням смуги спектральні втрати істотно зменшуються.

Так, наприклад, спектральні втрати для сигналу DVB-C2 частотною смугою 32 МГц (в якому передають, скажімо, 5 про шарків по 6,4 МГц) складають всього 3,25%, в той час як у системі DVB-C вони становлять 15%.

Зменшення втрат спектра за рахунок застосування OFDM в поєднанні з LDPC-кодуванням дозволило створити систему, що за ефективністю передавання близька до теоретичної межі. Якщо канали DVB-C знаходяться нижче теоретичної межі приблизно на 10 дБ, то канали DVB-C2, як можна бачити на рис. 6, відступають від графіка теоретичного максимуму всього 2-3 дБ.

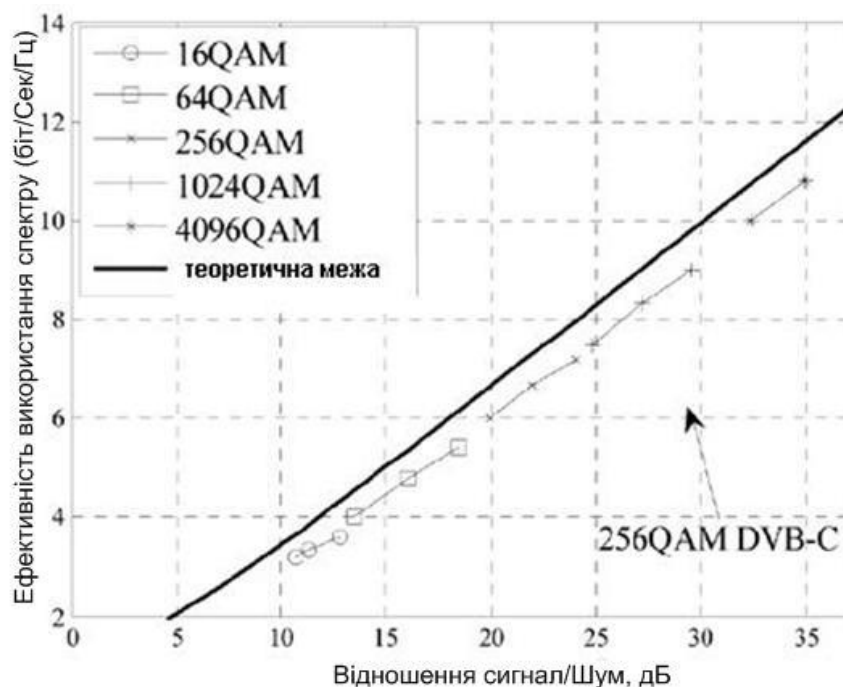


Рисунок 6 – Графіки спектральної ефективності систем DVB-C й DVB-C2 для різних швидкостей передавання інформаційних потоків та схем модуляції (параметри DVB-C2: ширина частотної смуги – 1/128, щільність сигналів пілот-тону 1/96)

У табл. 2 наведено можливі швидкості передавання інформаційних бітів для систем DVB-C й DVB-C2. Для більш наочного порівняння для обох систем розглянуто канал завширшки 8 МГц. У разі DVB-C2 загальну ширину частотної смуги обрано завбільшки у 32 МГц.

Таблиця 2 – Допустимі швидкості передавання інформаційних бітів для DVB-C (частково) і DVB-C2 у разі ширини каналу 8 МГц (параметри DVB-C2: ширина смуги – 32 МГц, захисний інтервал – 1/128, щільність пілот-сигналів – 1 / 96)

-	16 QAM	64 QAM	256 QAM	1024 QAM	4096 QAM
DVB-C	25 Мбіт/с	38,4 Мбіт/с	51,2 Мбіт/с	-	-
C2, 2/3	-	31,4 Мбіт/с	-	-	-
C2, 3/4	-	-	47,1 Мбіт/с	58,9 Мбіт/с	-
C2, 4/5	25,1 Мбіт/с	37,7 Мбіт/с	-	-	-
C2, 5/6	-	-	52,4 Мбіт/с	65,4 Мбіт/с	78,6 Мбіт/с
C2, 9/10	28,3 Мбіт/с	41,4 Мбіт/с	56,6 Мбіт/с	70,7 Мбіт/с	84,8 Мбіт/с

Нові режими, що з'явилися в DVB-C2, дозволяють збільшити швидкість на величину до 65% за необхідного відношення сигнал / шум 35 дБ, що в більшості сучасних кабельних мереж цілком можна реалізувати.

### ***Зменшення рівня завад від кабельних мереж***

Одним з найважливіших питань є зменшення рівня завад від кабельних мереж. Екрановане середовище передавання кабельних мереж теоретично дозволяє



використовувати в них весь частотний спектр від 0 до майже 1 ГГц. Але недосконала структура кабельної мережі всередині абонентських будинків і квартир у багатьох випадках призводить до випромінювання сигналів мережею КТБ в ефір. Іноді це випромінювання досягає рівнів, які можуть створити завади, наприклад, поліцейським або диспетчерському обладнанню авіаслужб. У цих випадках кабельних операторів примушують знизити рівень сигналу на критичних частотах (частотах, що створюють завади), або ж їм доводиться повністю вимкнути канали, що створюють завади. У DVB-C2 такої необхідності не буде. Оскільки стандарт дозволяє вирізати окремі OFDM-носійні, можна буде вибірково відключати тільки ті з них, які створюють завади, а не весь канал цілком, рис.7 . Така можливість теж допомагає знизити втрати спектра.

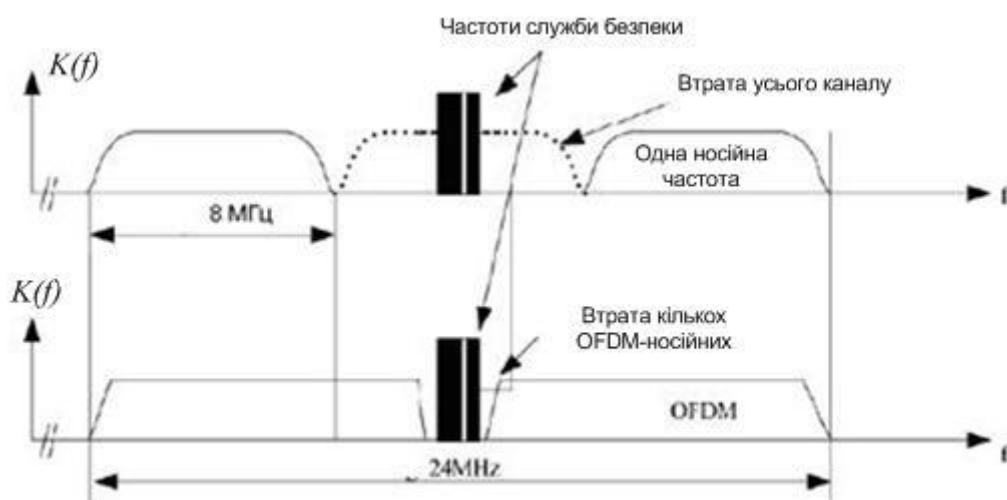


Рисунок 7 – Спектральні характеристики радіоканалу системи DVB-C2 із забороненими до використання частотними смугами

### **Висновок**

Стандарт **DVB-C2** дозволяє істотно збільшити ефективність використання частотного спектра. Це досягнуто за рахунок застосування більших розмірностей QAM-модуляції (до 4096 QAM) в поєднанні з потужною системою завадостійкого кодування із застосуванням LDPC-кодів. Крім того, застосування OFDM дає додатковий вииграш щодо гнучкості та ефективності передавання телевізійних сигналів, а також дозволяє здешевити створення універсальних мікросхем для приймачів DVB-T2/C2. Робочі можливості стандарту близькі до теоретичної межі. Це дозволяє створити з його застосуванням економічно ефективну систему, що забезпечує телевізійне мовлення високої та стандартної чіткості, а також інтерактивні послуги типу відео на замовлення або доступ до Інтернету. У стандарті також передбачено передавання сигнальних потоків без транспортних пакетів MPEG-2 TS із застосуванням протоколу GSE, що додатково знижує обсяг переданої службової інформації.

## Лекція 9

### СИСТЕМА МОБІЛЬНОГО ТЕЛЕМОВЛЕННЯ. СТАНДАРТ DVB-H

Навчальні питання:

1. Загальна характеристика системи DVB-H
2. Особливості каналного рівня системи DVB-H
3. Принцип ущільнення в часі потокової інформації
4. Особливості планування мереж DVB-T/H

#### 1. Загальна характеристика системи DVB-H

Стандарт DVB-H (мобільне мовлення) розроблено із застосуванням технічних рішень стандарту DVB-T, який було розроблено раніше (цифрове ефірне мовлення). У новому стандарті було доповнено функціональні можливості в частині розширення деяких встановлюваних параметрів, для врахування мобільних умов приймання цифрових сигналів.

Систему DVB-H було розроблено для вирішення таких завдань:

- економія струму споживання акумуляторної батареї мобільного терміналу. Це завдання виявилось визначальним під час формування концепції мобільного мовлення;
- надійне мобільне приймання під час руху, і навіть за умови руху на великих швидкостях;
- можливість приймання за умов багатопроменевого поширення сигналу, особливо в приміщеннях;
- повна сумісність з вже наявними мережами DVB-T.

Концептуальну структуру приймальної системи DVB-H наведено на рис.1, а структурну схему системи передавання сигнальних потоків для надання IP-послуг із застосуванням DVB-H наведено на рис.2.

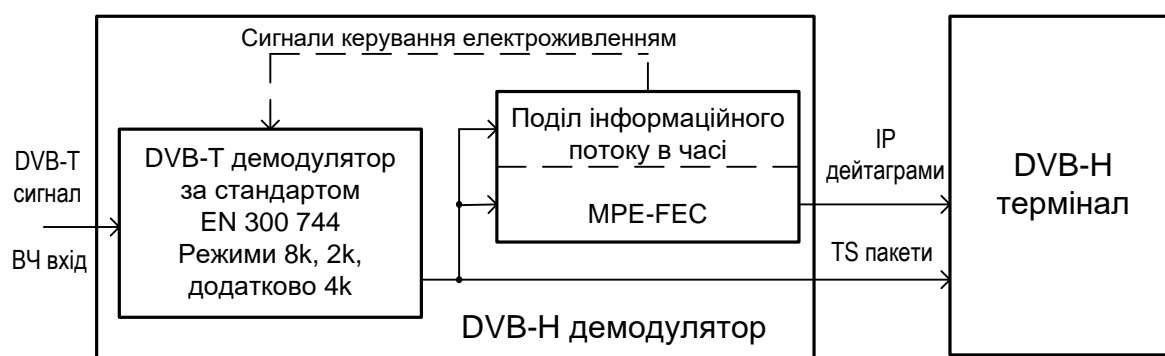


Рисунок 1 – Загальна схема приймальної системи DVB-H

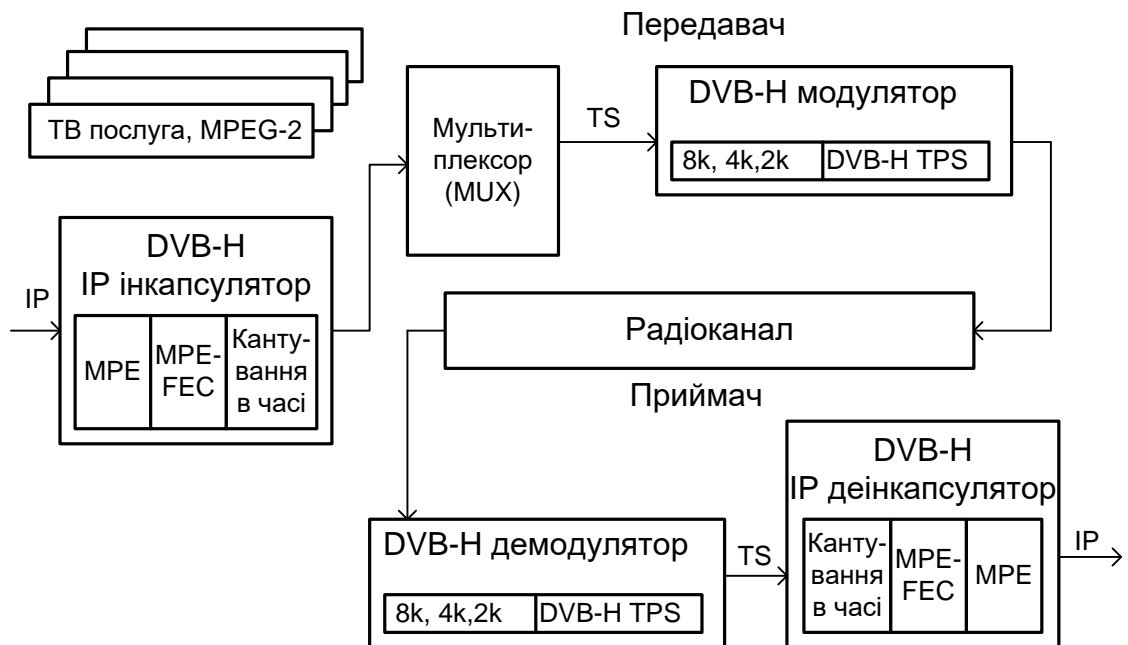


Рисунок 2 – Структура наскрізного IP-каналу системи DVB-H

Головні відмінності системи *DVB-H* порівняно із системою *DVB-T* закладено в каналному рівні (тобто рівні, вище фізичного рівня згідно мережній моделі).

Однією з таких відмінностей є квантування за часом (Time Slicing) і удосконалення завадостійкого кодування (MPE - FEC), що дозволило значно збільшити ймовірність правильного приймання порівняно із системою *DVB-T*.

## 2. Особливості каналного рівня системи DVB-H

Однією з основних відмінностей *DVB-H* від *DVB-T* полягає в тому, що в новій системі всю інформацію передбачено передавати у формі IP дейтаграм, які інкапсульовано у транспортні пакети MPEG-2 TS з використанням методу багатопротокольної інкапсуляції (*MPE Multi Protocol Encapsulation*). Це один з чотирьох методів інкапсуляції пакетів даних в транспортні пакети MPEG-2 TS, визначених організацією DVB (Digital Video Broadcasting Project – DVB Project), єдино придатний для передавання потокових послуг. Схему інкапсуляції наведено на рис. 2.

IP пакети інкапсулюють в MPE секції, а ті, в свою чергу, – в транспортні пакети MPEG-2 TS, які переносять елементарні потоки. Кожен IP пакет розміщують в одній секції MPE, довжина якої не узгоджена з розмірами пакетів MPEG2-TS. В одному пакеті можна передавати кілька MPE секцій, і, навпаки, одну секцію може бути розміщено у кількох транспортних пакетах.

Дані, що відносяться до однієї послуги, інкапсулюють у транспортні пакети MPEG-2 з постійним ідентифікаційним номером PID. Використання такого способу передавання даних обумовлено трьома причинами.

По-перше, в системах *DVB-H* передбачено передавати телевізійні потоки, стиснених не за системою MPEG-2, а із застосуванням більш ефективних систем, в першу чергу, в H.264/AVC3, для яких процес інкапсуляції стиснених аудіо та ві-

део в транспортні пакети MPEG -2 TS жорстко не специфікований і зазвичай його реалізують методом IP/MPE інкапсуляцією.

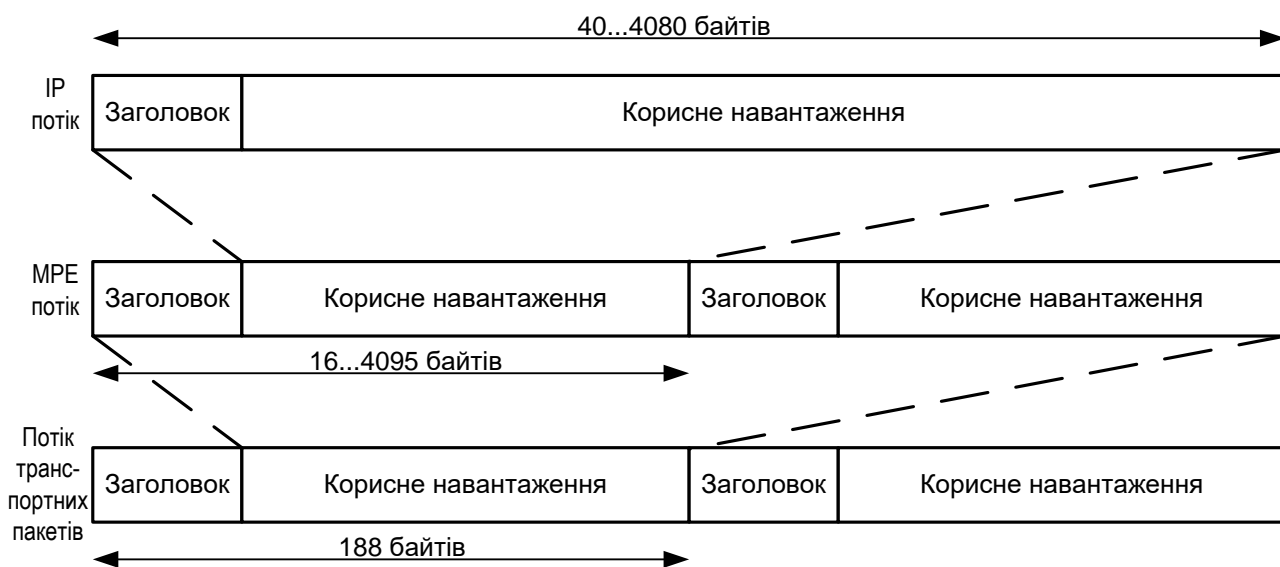


Рисунок 3 – Схема кількарівневої інкапсуляції даних у системі *DVB-H*

Слід також зазначити, що розробники розглядають DVB-H як складову частину гібридної системи доставки мультимедійних послуг (IPDC – IP DataCast).

У зв'язку з цим поняття елементарного потоку в DVB-H визначено інакше, ніж в стандарті MPEG-2. У DVB-H це просто потік, який передають пакетами з одним ідентифікатором (*PID*). У цій технології знято жорстку залежність елементарного потоку від даних певного типу. В одному елементарному потоці можна передавати всі дані, що відносяться до певної телевізійної програми або навіть до кількох програм. В останньому випадку потоки різних ТВ програм передають в пакетах даних (дейтаграмах) з різним груповими (*multicast*) *IP* адресами і об'єднують в *MPE* секції з різними *MAC* адресами. Аналогічним чином можна передавати і інформаційні потоки не телевізійних послуг.

Окремо зазначимо, що транспортну систему *DVB-H* розглядають в організації *DVB* як частину більш загальної системи надання мультисервісних послуг, в якій основним транспортним протоколом є протокол *IP*, а основними приймачами – кишенькові термінали з невеликою потужністю акумуляторів і обмеженою продуктивністю процесорів. Це платформа для створення гібридних мереж, в яких односпрямовані радіомовні канали передавання інформаційних потоків забезпечено системою *DVB-H*, а двонапрямлені канали – системами стільникової телефонії. Така гібридна система отримала назву IPDC (IP DataCast).

### 3. Принцип ущільнення в часі потокової інформації

Іншою відмінністю є реалізація принципу часового ущільнення, що дозволяє істотно економити споживання електричного струму DVB-H терміналу. Така система ущільнення англійсько називається *Time Sliced Multi Protocol Encapsulation*.

Часову діаграму, що ілюструє реалізацію цього принципу, наведено на рис.4. З наведеної діаграми випливає, що корисну інформацію передають/приймають зі збільшеною в кілька разів швидкістю (наприклад, 10 Мбіт/с), але протягом дуже короткого проміжку часу порівняно з часом очікування (тривалістю інтервалу між сусідніми інформаційними блоками).

Для якісного відтворення послуг мобільного телебачення засобами DVB-H цілком достатньо швидкості цифрової інформації 250 кбіт/с. Таким чином, у наведеному вище прикладі співвідношення інтервалів пасивного стану приймача і його активного стану становить 40 ( $(10 \text{ Мбіт/с}) / (0,25 \text{ Мбіт/с}) = 40$ ). Такий режим забезпечує економію 90% електроенергії батареї, яку споживає приймач-передавач у безперервному режимі.



Рисунок 4 – Часова діаграма робочого циклу приймача DVB-H

На додаток до режимів 2k і 8k передбачених у стандарті DVB-T у стандарті DVB-H передбачено іще один проміжний режим 4k, як найбільш адаптований для забезпечення зони покриття середнього розміру одночастотних (SFN) мереж.

Таблиця 1 – Параметри режимів OFDM системи DVB-T

Параметр	Режим 2k	Режим 4k	Режим 8k
Число активних носійних частот K	1 705	3 409	6 817
Число інформаційних носійних частот	1512	3024	6048
Тривалість одного робочого періоду T, мс	7/64	7/64	7/64
Тривалість корисної символної частини T <sub>U</sub> , мс	224	448	896
Рознесення між носійними частотами 1/T <sub>U</sub> , Гц	4 464	2 232	1 116
Рознесення між носійними частотами K <sub>min</sub> й K <sub>max</sub> , (K-1)/T <sub>U</sub> , МГц	7,61	7,61	7,61

У табл.2 та 3 наведено розрахункові значення цифрових потоків, Мбіт/с, для різних форматів модуляції (табл.2) і тривалості захисних інтервалів (табл.3).

Таблиця 2 – Розрахункові значення цифрових потоків, Мбіт/с

Модуляція	Швидкість коду	Захисний інтервал			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3,74	4,15	4,39	4,52
	2/3	4,98	5,53	5,86	6,03
	3/4	5,6	6,22	6,59	6,79
	5/6	6,22	6,92	7,32	7,54
	7/8	6,53	7,26	7,69	7,92
16QAM	1/2	7,46	8,3	8,78	9,05
	2/3	9,95	11,06	11,71	12,07
	3/4	11,2	12,44	13,17	13,58
	5/6	12,44	13,82	14,64	15,08
	7/8	13,07	14,51	15,37	15,83
64QAM	1/2	11,2	12,44	13,17	13,58
	2/3	14,93	16,59	17,57	18,1
	3/4	16,79	18,66	19,76	20,36
	5/6	18,66	20,74	21,95	22,62
	7/8	19,6	21,77	23,06	23,75

Таблиця 3 – Розрахункові значення цифрових потоків, Мбіт/с

Параметр	Режим											
	2k	4k	8k	2k	4k	8k	2k	4k	8k	2k	4k	8k
Корисна частина символного інтервалу, $T_U$	2048 Т 224 мкс											
Відносна тривалість захисного інтервалу, $\Delta/T_U$	1/4			1/8			1/16			1/32		
Тривалість захисного інтервалу, $T_g$	512 Т 56 мс	1024 Т 112 мс	2048 Т 224 мс	256 Т 28 мс	512 Т 56 мс	1024 Т 112 мс	128 Т 14 мс	256 Т 28 мс	512 Т 56 мс	64 Т 7 мс	128 Т 14 мс	256 Т 28 мс
Тривалість символу OFDM, $T_S = \Delta + T_U$	2560 Т 280 мс	5120 Т 560 мс	10240 Т 1120 мс	2304 Т 252 мс	4608 Т 504 мс	9216 Т 1008 мс	2176 Т 238 мс	4352 Т 476 мс	8704 Т 952 мс	2112 Т 231 мс	4224 Т 462 мс	8448 Т 924 мс

Рекомендації щодо умов застосування того чи іншого режиму можна сформулювати таким чином:

– режим 8k – для використання в одночастотних мережах будь-якого розміру (великих, середніх і малих). У разі застосування цього режиму система малочутлива до наявності доплерівського зсуву частоти, що виникає під час переміщення приймача з великою швидкістю (тобто приймання сигналу може відбуватись під час руху);

– режим 4k – для використання у малих та середніх за розмірами одночасотних мереж (SFN) у разі можливої наявності значних доплерівських зсувів частоти. Режим забезпечує приймання у разі дуже високих швидкостей переміщення приймача;

– режим 2k – для використання у малорозмірних SFN мереж. Гарантує впевнене мобільне приймання за найбільших швидкостей переміщення приймача (тобто за умови досить значних доплерівських зсувів частоти).

Компромісне рішення режиму 4k дозволяє забезпечити приймання телевізійних програм як портативними приймачами, так і мобільними приймачами за найбільш жорстких умов. Найкращою схемою модуляції DVB-H є модуляція КАМ-16 зі швидкістю кодування  $CR = 1/2$  або  $CR = 2/3$ , які забезпечують достатню пропускну здатність для DVB-H сигнальних потоків різних послуг за не дуже великого відношення відношенні носійна/шум ( $C/N$ ).

Побудову DVB-H мереж економічно доцільно здійснювати на підґрунті вже наявної мережі DVB-T з використанням ієрархічного режиму. Ієрархічна модуляція, як відомо, забезпечує можливість передавати два незалежні потоки, що мають різні робочі характеристики і швидкості передавання даних в одному і тому ж фізичному ВЧ каналі (тобто у смузі 7,61 МГц). У цьому випадку транспортний потік (TS) каналу з високим пріоритетом (HP) має завадозахищеність близьку до формату ФМ-4 (тобто максимально можливу). Ієрархічна модуляція, рис.5, є найбільш рентабельною, тому що вона забезпечує найбільшу ефективність використання частотного спектра.

Наприклад, в одному фізичному каналі ( $\Delta f = 8$  МГц) можна передавати два потоки:

– низькопріоритетним потік (LP): 64 QAM; SR = 11,06 Мбіт/с за мінімально необхідного значення  $C/N = 18,2$  дБ.

– високопріоритетних потік (HP): QPSK; SR = 5,53 Мбіт/с за умови  $C/N \geq 8,7$  дБ (релеївського каналу).

Таким чином, повна швидкість складе 16,59 Мбіт/с, але відмінність між HP і LP потоками щодо вимог стосовно відношення  $C/N$  становить близько 10 дБ. Це означає, що HP потік буде охоплювати істотно більшу зону обслуговування за однакових умов приймання.

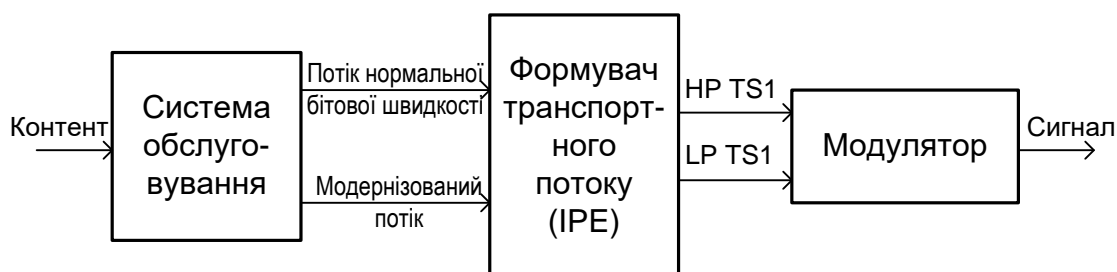


Рисунок 5 – Спрощена схема формування ієрархічного потоку DVB-T/H

Іноді, на практиці, можна досягти виграшу у разі застосування ієрархічного передавання того самого контенту в HP й LP потоках (рис.5). Через необхідність застосовувати ієрархічний режим під час вибору модулятора для передавача

DVB-T/H необхідно обов'язково вибирати такий, що забезпечує можливість ієрархічного режиму модуляції.

Окремо розглянемо можливість одночасно передавати сигнальні потоки різних послуг. Передавання паралельних інформаційних потоків визначає спосіб організації інформаційного транспортного потоку (TS). Найпростішою технологією організації DVB-H потоку є організація його таким чином, що кожен потік передають з розподілом в часі, рис.6.

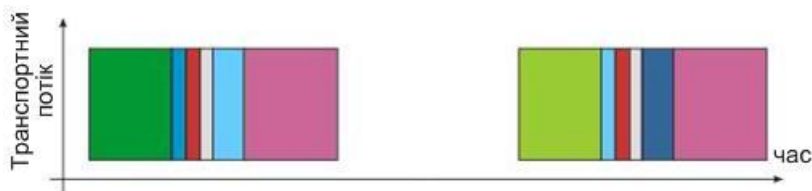


Рисунок 6 – Діаграма послідовного розподілу інформаційних потоків в часі

Різні за обсягом сигнальні потоки (виділено кольором) розташовують один за іншим (тобто послідовно) в межах інтервалу часу певного циклу. У наступному інтервалі сигнальні потоки послуг повторюють у такому ж порядку. У разі такого послідовного передавання усі послуги мають однакову максимальну (пакетну) пропускну здатність.

Однак, ті ж самі сервісні інформаційні потоки можна передавати із застосуванням іншого способу розподілу в телекомунікаційному каналі, рис.7. Фрагменти інформаційних потоків різних послуг можна розташувати у змішаних транспортних потоках. Такий спосіб організації транспортних потоків забезпечує різну швидкість передавання потоків різних послуг за однакової тривалості інтервалу передавання.

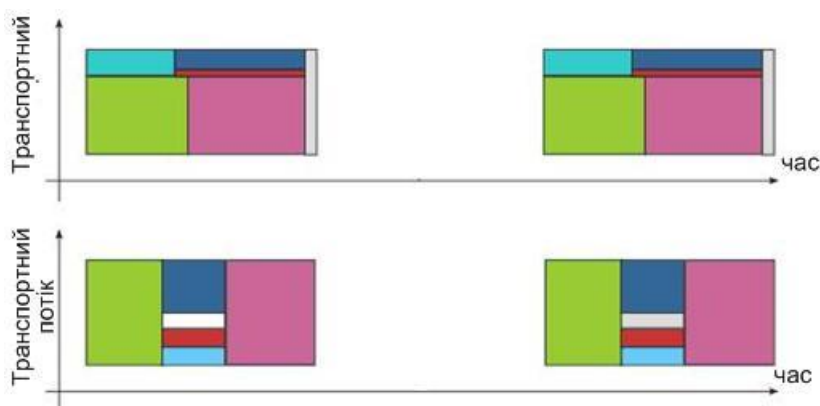


Рисунок 7 – Діаграма розподілу інформаційних потоків у змішаному транспортному потоці

Як впливає з діаграми, рис 7, загальний обсяг переданої інформації (загальна площа зафарбованих сегментів) буде таким, як на рис.5, але спосіб, яким передано сегменти потоків різних сервісів інший.

Однією з причин, що обумовлює необхідність передавати інформаційні потоки двох або більше паралельних послуг є одночасне надходження їх у часі. Па-



ралельне приймання сигналів дозволяє зменшити потужність споживання терміналу внаслідок того, що зазвичай приймач витрачає 50-100 мс під час кожного ввімкнення для приймання сигнального потоку нової послуги.

#### 4. Особливості планування мереж DVB-T/H

Одним із найбільш важливих питань, що необхідно вирішувати під час планування будь-якої мережі радіомовлення є розрахунок зони покриття.

Розрахунок зони покриття містить дві основні складові:

– розрахунок мінімальної напруженості електричного поля  $E_{\min}$ , за якої ще можливе приймання сигналу із заданою ймовірністю помилки (коефіцієнтом помилкових бітів,  $BER$ );

– розрахунок напруженості поля в будь-якій точці приймання за відомої ефективно випромінюваної потужності передавача (ЕІВП), висоті підняття передавальної антени, наявного ландшафту, пори року, погодних умов тощо.

За двома наведеними вище параметрами, як і для більшості радіомовних мереж, знаходять знасення напруженості поля в точці приймання і межі зони обслуговування в заданому напрямку.

Мінімальна напруженість поля для діапазону ДМВ залежить від коефіцієнта шуму мобільного терміналу  $F$ , коефіцієнта підсилення приймальної антени  $G_a$ , носійної частоти  $f$  та необхідного відношення сигнал/шум ( $C / N$ ):

$$E_{\min [dB\mu V/m]} = -30 + f_{[dB]} + C/N_{[dB]} - G_a = 20 \lg(f)_{[MHz]} \quad (1)$$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени мобільного терміналу має невеликі значення (типові значення -5 ... -10 дБ). Для розрахунку зони покриття розрізняють також портативне й мобільне приймання, внутрішньо або зовнішньо-будинкове приймання, допустиму швидкість переміщення мобільного терміналу, ймовірність приймання.

З урахуванням зазначених вище умов розрізняють чотири класи приймання:

– Клас А (поза будинкове приймання) і клас В (приймання всередині приміщення) для портативного приймання;

– Клас С (поза будинкове приймання) і клас D (внутрішньо-будинкове приймання) для мобільного приймання.

Розрахункові значення мінімально допустимої медіанної напруженості електричного поля  $E_{\text{мед.мін}}$  у разі значення коефіцієнта шуму мобільного терміналу 6 дБ для абонентських терміналів різних класів наведено в табл. 4, ..., таб. 6.

Таблиця 4 – Значення мінімально допустимої медіанної напруженості електричного поля  $E_{\text{мед.мін}}$  (Портативне приймання поза приміщенням (Клас А). Міські умови приймання, 3-я категорія приймального терміналу.)

Назва параметра	500 МГц			800 МГц		
	2	14	26	2	14	26
Мінімальне $C/N$ , дБ	2	14	26	2	14	26
Коефіцієнт підсилення антени, $G_a$ , дБ	-12			-7		
Мінімальна еквівалентна напруженість поля, $E_{\text{мін}}$ , дБ/мкВ/м	44	56	68	43	55	67
Мінімальна медіанна еквівалентна напруженість поля у разі $h = 10\text{м}$ , 50% часу й 50% поверхні, дБ/мкВ/м:						
- для ймовірності 70%	69	81	93	70	82	94
- для ймовірності 95%	75	87	99	76	88	100

Таблиця 5 – Значення мінімально допустимої медіанної напруженості електричного поля  $E_{\text{мед.мін}}$  (Портативне приймання всередині приміщення (Клас В). Міські умови приймання, 3-я категорія приймального терміналу.)

Назва параметра	500 МГц			800 МГц		
	2	14	26	2	14	26
Мінімальне $C/N$ , дБ	2	14	26	2	14	26
Коефіцієнт підсилення антени, $G_a$ , дБ	-12			-7		
Мінімальна еквівалентна напруженість поля, $E_{\text{мін}}$ , дБ/мкВ/м	44	56	68	43	55	67
Мінімальна медіанна еквівалентна напруженість поля у разі $h = 10\text{м}$ , 50% часу й 50% поверхні, дБ/мкВ/м:						
- для ймовірності 70%	81	93	105	82	94	106
- для ймовірності 95%	91	103	115	92	104	116

Таблиця 6 – Значення мінімально допустимої медіанної напруженості електричного поля  $E_{\text{мед.мін}}$  (Мобільне приймання поза приміщенням (Клас С). Сільські умови приймання, 1-я категорія приймального терміналу.)

Назва параметра	500 МГц			800 МГц		
	2	14	26	2	14	26
Мінімальне $C/N$ , дБ	2	14	26	2	14	26
Коефіцієнт підсилення антени, $G_a$ , дБ	-2			-1		
Мінімальна еквівалентна напруженість поля, $E_{\text{мін}}$ , дБ/мкВ/м	34	46	58	37	49	61
Мінімальна медіанна еквівалентна напруженість поля у разі $h = 10\text{м}$ , 50% часу й 50% поверхні, дБ/мкВ/м:						
- для ймовірності 70%	52	64	76	69	81	93
- для ймовірності 95%	58	70	82	75	87	99

Таблиця 7. Значення мінімально допустимої медіанної напруженості електричного поля  $E_{\text{мед.мін}}$  (Мобільне приймання поза приміщенням (Клас D). Сільські умови приймання, 3-я категорія приймального терміналу.

Назва параметра	500 МГц			800 МГц		
	2	14	26	2	14	26
Мінімальне $C/N$ , дБ	2	14	26	2	14	26
Коефіцієнт підсилення антени, $G_a$ , дБ	-12			-7		
Мінімальна еквівалентна напруженість поля, $E_{\text{мін}}$ , дБ/мкВ/м	44	56	68	43	55	67
Мінімальна медіанна еквівалентна напруженість поля у разі $h = 10\text{м}$ , 50% часу й 50% поверхні, дБ/мкВ/м:						
- для ймовірності 70%	69	81	93	70	82	94
- для ймовірності 95%	75	87	99	76	88	100

Під час визначення ЗП (зони покриття) необхідно обумовити і категорію використовуваного приймального DVB-H терміналу.

Категорія 1 – інтегровані автомобільні термінали, де антена становить одне ціле з автомобілем.

Категорія 2 – портативне цифрове ТВ устаткування, призначене для внутрішнього і зовнішнього приймання сигналів цифрового телебачення з терміналом, підключеним до антени. Ця категорія поділяється на дві підкатегорії:

2а) розмір екрану приймача зазвичай більше 25 см, а приймач може отримувати електроживлення від акумуляторної батареї або мережного живлення. Такий термінал зазвичай є стаціонарним, до нього приєднують зовнішню антену (ширококутну активну або пасивну, висувну телескопічну тощо).

2б) закінчений цифровий телевізійний приймач на батарейках, який може бути використано під час руху. Зазвичай антени складають одне ціле з таким приймачем.

Категорія 3 – ручні портативні термінали з вбудованим модулем мережного зв'язку (наприклад, стандарту GSM). Такі термінали мають функціональність мобільного телефону і здатні приймати IP послуги, які реалізовано із застосуванням DVB-H технології. Зазвичай в даній категорії DVB-H антена і антена стільникового зв'язку є вбудованими і становлять одне ціле з терміналом.

Під час визначення ЗП для різних умов приймання використовують три умовних рівня:

Місцезнаходження точки приймання – це найменша частина простору (**перший рівень**), для якого передбачено, що розміщення приймача обмежене просторовим сегментом 0,5 x 0,5 метра. Передбачається, що оптимальних умов приймання можна досягти переміщенням приймача в межах 0,5 м в будь-якому напрямку. Таке місце приймання розцінюють як охоплене радіосистемою, якщо необхідні значення відношення носійна/шум ( $C/N$ ) і носійна/інтерференція ( $C/I$ ) забезпечено протягом 99% часу.

Охоплення малої зони – це **другий рівень**. «Мала зона» має типові розмірами 100 x 100 м. Іноді (наприклад, в стільниковій телефонії) обумовлюють і меншу зону габаритами 10 x 10 м. Для такої малої зони задають відсоток охопленого простору розміщення приймача (наприклад, 50%).

Якість охоплення малої зони класифікують як:

- «Хороше», якщо забезпечено, принаймні, 95% місць приймання на краю зони охоплення портативним прийманням і 99% місць приймання забезпечено мобільним прийманням;

- «Прийнятне», якщо, принаймні, 70% місць приймання на краю зони охоплення забезпечено портативним прийманням і 90% місць приймання забезпечено мобільним прийманням;

Зону покриття віднесено до **третього рівня**. ЗП (або охоплення) формується з суми індивідуальних малих зон, в яких досягнуто той чи інший клас охоплення.

### Основна література

1. Ю.Б.Зубарев, М.И.Кривошеев, И.Н.Красносельский. Цифровое телевизионное вещание. Основы методы системы. – М: Научно-исследовательский институт радио (НИИР), 2001. – 568 с.
2. Локшин Б.А. Цифровое вещание: от студии к телезрителю. – М., “Сайрус Системс”, 2001г. – 446с.

### Додаткова література

3. ETSI EN 302 307. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation system for Broadcasting Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications.
4. ETSI EN 300 421. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services.
5. ETSI EN 301 210. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite.
6. M.Eroz, F.-W Sun and L.-N. Lec: “DVB-S2 Low Density Parity Cheek Codes with near Shannon Limit Performance”, International Journal on Satellite Communication Networks, 2004, 22.
7. ETSI TR 102 376 v1.1.1 (2005-02). Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2).
8. ETSI EN 300 744. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.
9. . European Standard EN 300 429 v.1.2.1 (1998-04). Digital Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems.
10. Песков С.Н., Колпаков И.А. Рекомендации по внедрению DVB-T эфирного вещания. Режимы работы передатчика. “Телеспутник ”, 2007г., №2, с.102-108.
11. Константин Гласман, Методы передачи данных в цифровом телевидении. Часть 3. Стандарт цифрового DVB-T /«625», 1999г., №9.
12. Александр Ануфриев. Стандарт DVB-S2 как средство развития новых сервисов на спутниковых сетях связи /"Broadcasting. Телевидение и радиовещание".
13. Система мобильного телевидения DVB-H  
[http://www.connect.ru/journal\\_search.asp?topic=34&id=10](http://www.connect.ru/journal_search.asp?topic=34&id=10)