

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Моделювання систем зв'язку з OFDM модуляцією


ДРТР. 2015009.02.05.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-19-2


підпис

Б.В. Трач
Ініціали, прізвище

Керівник: д-р техн. наук, доц.


підпис

С.К. Підченко
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, доц.


підпис

С.К. Підченко
Ініціали, прізвище

11 12 2020 р.

Хмельницький, 2020

Хмельницький національний університет

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем
 Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій
 Освітній рівень другий (магістерський)
 Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
 Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
 Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

TMIT

«3» 09 2020р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Грач Богдан Вікторович

1 Тема роботи: Моделювання систем зв'язку з OFDM модуляцією

керівник роботи Підченко Сергій Костянтинович, д.т.н, доцент

Загверджено наказом по університету від «1» вересня 2020р. № 118.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 30.11.2020р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: дослідження цифрових систем зв'язку з ортогональним частотним поділом каналів в середовищі Matlab.

Об'єкт дослідження: процес передачі і приймання сигналів з ортогональним частотним поділом каналів у цифрових системах зв'язку.

Предмет дослідження: методи та засоби отримання модуляції з ортогональним частотним поділом каналів у цифрових системах зв'язку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Приймання сигналів у мобільному зв'язку. Оцінка каналу зв'язку.

Використання систем зв'язку з модуляцією OFDM. Мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів.

Завдання отримав

Науковий керівник

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра на тему: «Моделювання систем зв'язку з OFDM модуляцією» виконана студентом другого курсу гр. ТРМ-19-2 Трачем Богданом Вікторовичем кафедри «Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій» Хмельницького національного університету у 2020 р. Керівник роботи д.т.н., доц. Підченко Сергій Костянтинович.

Робота складається з вступу, 4 розділів, основних висновків по роботі, списку використаних джерел (20 бібліографічних посилань, 2 сторінок) та 2 додатків (18 сторінок). Загальний обсяг роботи в якому викладено основний зміст складає 83 сторінки і містить 40 рисунків на 40 сторінках. Повний обсяг роботи – 107 сторінок.

Дипломна робота присвячена дослідженню цифрових систем зв'язку з ортогональним частотним поділом в середовищі Matlab. Канали із завмираннями характеризуються випадковою зміною коефіцієнта передачі, тому параметри сигналів на вході приймача є випадковими і невідомими. Випадкові зміни параметрів каналу зв'язку являють собою мультиплікативну заваду. Ускладнюють реалізацію модуляції OFDM такі питання, як додавання циклічного префікса для усунення завад і боротьби з завмираннями, процедури тактової та фазової синхронізації, використання пілотних під несучих, тощо. Досліджено застосування згорткового коду і OFDM модуляції. Модуляція 16QAM з OFDM має енергетичний вигравш у порівнянні з згортковим кодом швидкістю $2/3$ і модуляцією 16QAM на 1,5 дБ.

Ключові слова: OFDM, 16QAM, швидке перетворення Фур'є.

ABSTRACT

Master's thesis proposal: "Modeling of communication systems with OFDM modulation" performed by a second-year student gr. TRM-19-2 Trach Bohdan Viktorovych, Department of Telecommunications, Media and Intellectual Technologies, Khmelnytsky National University in 2020. Supervisor, Ph.D., Assoc. Pidchenko Sergey Konstantinovich.

The work consists of an introduction, 4 sections, main conclusions on the work, a list of sources used (20 bibliographic references, 2 pages) and 2 appendices (18 pages). The total volume of the work in which the main content is stated is 83 pages and contains 40 figures on 40 pages. The full volume of the work is 107 pages.

Thesis is devoted to the study of digital communication systems with orthogonal frequency division in the Matlab environment. Fading channels are characterized by a random change in the transmission factor, so the parameters of the signals at the input of the receiver are random and unknown. Random changes in the communication channel parameters are a multiplicative interference. Complications of OFDM modulation are complicated by issues such as the addition of a cyclic prefix to eliminate interference and fade suppression, clock and phase synchronization procedures, the use of pilot subcarriers, and so on. The application of convolutional code and OFDM modulation is investigated. 16QAM modulation with OFDM has an energy gain compared to 2/3 convolutional code and 1.5 dB 16QAM modulation.

Keywords: OFDM, 16QAM, fast Fourier transform.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Приймання сигналів у мобільному зв'язку.....	9
1.1 Багатопроменеве приймання сигналів.....	9
1.2 Рознесене приймання сигналів.....	11
1.3 Rake-приймач.....	13
1.4 Модель багатопроменевого каналу.....	15
1.5 Боротьба з завмираннями у рухомому зв'язку.....	17
1.6 Спотворення сигналу у каналі передачі.....	22
Висновки до першого розділу.....	26
2 Оцінка каналу зв'язку.....	27
2.1 Шкідливі впливи у каналах зв'язку	27
2.2 Підвищення енергетичної ефективності систем зв'язку	28
2.3 Передача та обробка сигналів з OFDM.....	30
2.4 Аналіз характеристик навмисних завад для систем радіозв'язку.....	38
2.5 Спотворення сигналу з OFDM при впливі навмисних завад.....	41
2.6 Оцінка впливу зсуву несучої частоти на якість OFDM сигналу.....	45
Висновки до другого розділу.....	49
3 Використання систем зв'язку з модуляцією OFDM.....	50
3.1 Модуляція QAM	50
3.2 Модуляція OFDM	52
3.3 Демодулятор сигналів з OFDM модуляцією.....	56
3.4 Цифрова система зв'язку з OFDM модуляцією.....	57
3.5 Використання сигналів OFDM в бездротовому зв'язку	61
Висновки до третього розділу.....	65
4 Дослідження систем зв'язку з ортогональним частотним поділом каналів.....	66
4.1 Особливості модуляції OFDM	66
4.2 Дослідження принципів формування сигналів з OFDM.....	70

4.3 Моделі систем зв'язку з OFDM у середовищі Matlab і Simulink	81
Висновки до четвертого розділу	86
Висновки	87
Перелік джерел посилання	89
Додаток А. Презентація	91
Додаток Б. Апробація роботи	100

ВСТУП

Актуальність теми

Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM) - це ефективний формат модуляції, що використовується в сучасних системах бездротового зв'язку. OFDM поєднує в собі переваги квадратурної амплітудної модуляції (QAM) і мультиплексування з частотним поділом каналів (FDM) для створення системи зв'язку з високою швидкістю передачі.

Ортогональні сигнали з обмеженою смугою частот можна комбінувати із значним перекриттям, уникаючи при цьому міжканальних завад. Використовуючи OFDM, ми можемо створити масив піднесучих, які працюють разом для передачі інформації в діапазоні частот.

Ці піднесучі повинні бути ортогональними функціями. Точне математичне визначення ортогональності між двома функціями полягає в тому, що інтеграл їх добутку за вказаний інтервал часу дорівнює нулю. У більш широкому сенсі ми можемо розглядати ортогональні функції як статистично не пов'язані.

Модуляція з декількома несучими, особливо системи мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM), використовуються в високошвидкісних цифрових передавачах і вважаються оптимальними для частотно-вибіркових каналів. При цьому передається потік даних на великій кількості піднесучих в межах використовуваної смуги частот каналу. Реалізація DSP як передавача, так і приймача з використанням методів швидкого перетворення Фур'є спрощує реалізацію систем з OFDM.

При практичній реалізації цих систем виникає багато проблем. Одним з них є велике відношення пікової потужності до середньої потужності, яке вимагає використання підсилювача високої потужності з великим лінійним діапазоном, щоб уникнути інтермодуляційних ефектів та позасмугових випромінювань.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є дослідження цифрових систем зв'язку з ортогональним частотним поділом в середовищі Matlab. Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

- провести огляд методів боротьби з багатопроменевим прийманням сигналів у цифрових системах зв'язку;
- розглянути і проаналізувати шкідливі впливи у каналах зв'язку і шляхи їх зменшення;
- дослідити модель системи зв'язку з OFDM модуляцією в середовищі Matlab, оцінити енергетичну ефективність.

Об'єкт дослідження – процес передачі і приймання сигналів з ортогональним частотним поділом каналів у цифрових системах зв'язку.

Предмет дослідження – методи та засоби отримання модуляції з ортогональним частотним поділом каналів у цифрових системах зв'язку.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених наукових завдань використовується математичний апарат теорії цифрової обробки сигналів, статистичного оцінювання, теорії приймання та оброблення сигналів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше проведена оцінка енергетичної ефективності цифрових систем зв'язку з OFDM модуляцією.
2. Набув подальшого розвитку метод оцінки спотворень модульованого сигналу цифрових систем зв'язку.
3. Отримали подальший розвиток методи ортогонального частотного поділу каналів.

Практичне значення одержаних результатів:

Проведена оцінка енергетичної ефективності цифрових систем зв'язку з OFDM модуляцією дозволяє обирати кращий режим роботи системи зв'язку в залежності від відношення сигнал-шум.

Публікації. Результати дипломної роботи магістра опубліковані в одній статті у науковому журналі «Вісник Хмельницького національного університету».

Структура та обсяг магістерської атестаційної роботи. Дипломна робота магістра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання та додатків. Дипломна робота магістра має загальний обсяг сторінок, з яких основний зміст викладений на сторінках друкованого тексту, містить рисунків та таблиць. Перелік джерел посилання складається з джерел.

1 ПРИЙМАННЯ СИГНАЛІВ У МОБІЛЬНОМУ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Багатопроменеве приймання сигналів

У радіомережах на базі технологій TDMA і FDMA багатопроменеве приймання в певному сенсі не використовується, оскільки приймається тільки один промінь (всі інші інтерпретуються як завади), а боротьба з завмираннями і багатопроменевими спотвореннями сигналу в даному випадку зводиться до нівелювання впливу «непотрібних» променів (шляхом виділення променя з максимальною потужністю і усунення інтерференції між променями). У системах, побудованих на основі технології CDMA, навпаки, приймається весь багатопроменевий сигнал і визначається потужність кожного променя, щоб оптимальним чином підсумувати їх, підвищивши достовірність прийому корисної інформації. Така обробка сигналу зазвичай виконується за допомогою Rake-приймача або багатоканального узгодженого фільтра. Число променів, прийнятих CDMA-приймачем, зазвичай невелике - від 3 до 6 [1].

Найчастіше багатопроменевість виникає як результат багаторазового відбиття сигналу, що передається від будівель і інших перешкод на шляху поширення радіохвиль. Відбиті сигнали можуть інтерферувати з прямим променем, що має найбільшу інтенсивність. Сигнали різних променів зсунуті за часом один відносно одного, що обумовлено різною довжиною траси їх проходження. Оскільки завжди існує декілька шляхів поширення радіохвиль від передавача до приймача, то в точці прийому різні копії одного і того ж сигналу інтерферують один з одним, створюючи глибокі завмирання радіохвилі, які в основному і впливають на якість передачі інформації і пропускну здатність системи.

Крім ефекту багатопроменевості при реалізації рухомого зв'язку деколи виникає доплерівські зсуви частоти, обумовлені переміщенням абонента в

процесі сеансу. Взагалі кажучи, сигнали різних променів можуть мати різні амплітуди, початкові фази, затримки і доплерівські зсуви частоти.

Частотно-часові зсуви сигналів в багатопроменовому каналі зв'язку викликають селективні завмирання, що залежать від часу або частоти.

При частотно-селективних завмираннях окремі складові сигналу мають різні амплітуди і зсуви початкової фази, але головне, що розкид затримки сигналу (тобто різниця ходу променів за часом) порівняна з значенням $1/F$ (F - смуга частот сигналу, що передається) або перевищує його. Цей вид завмирань призводить до спотворення форми спектра і, як наслідок, до зниження якості зв'язку. Однак характер завмирань на близько розташованих частотах практично однаковий, а степінь кореляції сигналів досить висока, тому спотворення починають проявлятися лише в тому випадку, якщо смуга сигналу, що передається перевищує ширину так званої смуги когерентності каналу - B_c (тобто сигнал «перехоплює» область частот, в якій окремі спектральні складові корельовані). Таким чином, чим ширше спектр сигналу, що передається, тим більшою мірою він схильний до частотно-селективних завмирань [1].

Значення коефіцієнта кореляції τ_k залежить від застосовуваного методу обробки сигналів в кодеку і модемі і може змінюватися від 0,5 до 0,9. Граничне значення τ_k на границі смуги B_c зазвичай приймається рівним 0,7.

Якщо різниця ходу променів сумірна з часом передачі одного символу T (або тривалістю елемента сигналу), то при багатопроменовому поширенні виникають не тільки частотно-селективні завмирання, але і накладення друг на друга сусідніх за часом елементів сигналу. А цей ефект призводить до появи міжсимвольних спотворень (МСІ). Зазвичай для оцінки ширини спектра служить так звана база сигналу $B = 2FT$. Якщо значення B мало (величини $1/F$ і T одного порядку), то частотно-селективні завмирання буде супроводжувати МСІ. При великих значеннях бази сигналу можливі випадки, коли різниця ходу променів d порівнянна з величиною $1/F$, але значно менше тривалості елемента T . Тоді вплив МСІ майже невідчутно.

Завмирання, при яких характеристики каналу зв'язку змінюються з плином часу, викликаючи спотворення форми переданих символів, називають часовими селективними завмираннями. Супроводжуючі їх спотворення проявляються лише тоді, коли тривалість інформаційної послідовності починає перевищувати час когерентності T_c (інтервал, в межах якого будь-які відліки сигналу взаємозалежні, а поза ним в значній мірі декорреліровані). Час когерентності визначається величиною розкиду доплерівської частоти в каналі зв'язку, яка залежить від швидкості переміщення рухомого об'єкта.

1.2 Рознесене приймання сигналів

Одним з найбільш ефективних методів боротьби з багатопроменевими завмираннями є так зване рознесення сигналу. Відповідно до теорії, вигравш від рознесенного прийому досягається лише в тому випадку, якщо сигнал, що потрапляє по декількох незалежних шляхах в точку прийому, має приблизно однакову середню потужність променів (тільки тоді можна стверджувати, що хоча б один з сигналів не буде схильний до глибоких завмирань). Існує два основні методи боротьби з завмираннями: явне і неявне рознесення.

При явному рознесенні по каналу зв'язку передається один або декілька надлишкових сигналів, що містять ту ж корисну інформацію, що і основний промінь. В даний час найбільш часто застосовуються три способи явного рознесення - просторове, частотне і часове [2].

При неявному рознесенні надлишкові сигнали не використовуються. Їх роль грають декілька незалежних копій сигналу, які утворюються на вході приймача за рахунок декорреляції сигналу в багатопроменевому каналі.

Одна з переваг технології CDMA полягає в тому, що в ній можуть бути використані практично всі відомі методи рознесенного прийому. На базовій станції найчастіше застосовується просторове рознесення, а в абонентських

терміналах найбільш популярні методи, які не потребують введення додаткових каналів прийому (наприклад, часове рознесення).

Просторове рознесення стало найпершим методом боротьби з завмираннями: воно було реалізовано ще в 1927 році і базувалося на використанні декількох антен. Щоб забезпечити ефективний прийом, наприклад, на дві антени, досить рознести їх на відстань не менше 10 або 20λ (λ - довжина хвилі). В цьому випадку додатковий частотний ресурс не потріб-но, застосування додаткових антен значно ускладнює обладнання станції.

Існує декілька видів просторового рознесення. На базових станціях реалізується просторове рознесення в горизонтальній площині. Рознесення у вертикальній площині може бути застосовано лише в мережах микросотового зв'язку, де допускається великий розкид за кутом прийому сигналів.

Якщо задіюється інший різновид просторового рознесення - поляризаційне, то сигнали передаються і приймаються з різними ортогональними поляризаціями (вертикальної і горизонтальної). І хоча в такому випадку додаткова антена не потрібна, рівень потужності кожного каналу стає приблизно на 3 дБ меншим, ніж при використанні сигналу однієї поляризації. (при неявному поляризаційному рознесенні, коли сигнал приймається за допомогою однієї крос-поляризованої антени, рівні потужності в різних каналах можуть відрізнятися на 10-12 дБ) [1]

У системах на базі стандартів 3-го покоління планується використовувати ряд оригінальних методів боротьби з завмираннями. Так, для систем стандарту DS-CDMA передбачено застосування просторово-кодового рознесення (ортогонального рознесення на передачу, OTD), при якому через кожну з антен базової станції випромінюється своя ортогональна кодова послідовність. У проекті UTRA (ETSI) запропонований інший спосіб: сигнал стискається в часі і випромінюється по черзі через дві антени

(наприклад, через одну проходять тільки парні пакети, а через іншу - непарні), причому потужність передавача ділиться між ними порівну.

Метод частотного рознесення заснований на випромінюванні одного і того ж сигналу на різних частотах. Виграш досягається тільки в тому випадку, якщо інтервал між несучими частотами більше ширини смуги когерентності B_c [2].

Комбіноване просторово-частотне рознесення реалізоване на базі стандарту cdma 2000. Багаточастотний сигнал буде передаватися через рознесені антени, що не потребує ускладнення абонентського терміналу, оскільки прийом таких сигналів забезпечується багатоканальним Rake-приймачем, кожен канал якого налаштований на свою складову.

Часове рознесення в CDMA-мережах грає ту ж роль, що і в системах з часовим доступом (TDMA). При використанні цього методу для боротьби з пакетами помилок, які утворюються при глибоких завмираннях, застосовується по-блочне перемеження в поєднанні з кодами, що виправляють помилки. Операція перемеження дозволяє декорелювати пакети помилок за рахунок їх перетворення в групу випадкових (одиначних) помилок. Останні ефективно виправляються згортковим декодером. Оскільки при перемеженні змінюється лише порядок проходження символів в межах одного або декількох кадрів, то даний метод не вносить надмірності, а отже, не призводить до зниження середньої потужності передавача.

1.3 Rake-приймач

Принцип дії Rake-приймача, який був створений для прийому рознесених сигналів, заснований на роздільній обробці всіх багатопроменевих компонентів і обчисленні їх середньозваженої суми. У наземних радіоканалах характеристики цих компонентів можуть незначно відрізнятися (на величину, яку можна порівняти з тривалістю одного символу шумоподобного сигналу - чіпа). Компоненти, віддалені один від одного

більш ніж на один чіп, обробляються і підсумовуються. Що ж стосується дрібномасштабних змін затримки (менше ніж на один чіп), вони можуть бути усунені при прийомі за допомогою схеми кодового стеження, яка дозволяє виміряти час затримки для кожного компонента сигналу і нівелювати малі зміни (рис. 1.1) [3].

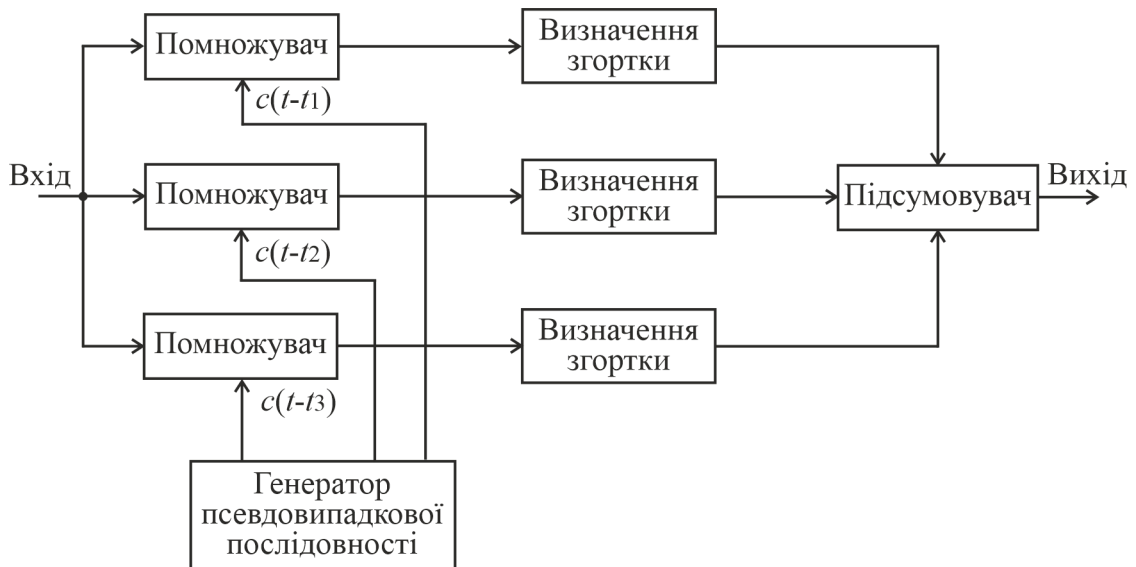


Рисунок 1.1 – Спрощена структурна схема триканального Rake-приймача

Оскільки на практиці число порівнюваних по потужності променів не перевищує 3-4, то в класичному Rake-приймачі зазвичай реалізується триканальна схема (рис. 1.1), яка дає можливість виділяти три компоненти багатопроменевого сигналу з різними затримками (τ_1, τ_2, τ_3) і коефіцієнтами передачі (K_1, K_2, K_3). У кожному каналі прийому вхідний сигнал, затримка якого узгоджена з часом поширення багатопроменевого сигналу, перемножується з кодовою послідовністю. Після згортки обчислюється (за допомогою схеми складання) середньозважена за максимумом відношення сигнал/шум сума сигналів різних каналів прийому. В результаті такої обробки всі промені, що випереджають основний промінь або запізнюються

щодо нього на величину, більшу $1/F$, створюють на виході кореляторів лише невеликі сплески (замість великих завад), які відкидаються Rake-приймачем.

У реальному житті при переміщенні мобільного об'єкта змінюються умови відображення радіохвиль, а отже, і коефіцієнти ослаблення сигналу і затримка. Щоб відстежити такі зміни і оптимальним чином перерозподілити канали Rake-приймача, в ньому зазвичай передбачаються ще 1-2 допоміжних канали, що призначені для зондування багатопроменевого середовища.

Описана схема роботи приймача реалізована в системі з кодовим доступом на базі стандарту cdmaOne (IS-95).

Її мобільний термінал виконаний на основі триканального Rake-приймача з одним додатковим скануючим каналом, який забезпечує періодичне вимірювання характеристик багатопроменевого середовища. На етапі пошуку термінал використовує тільки допоміжний скануючий канал, за допомогою якого відстежуються сигнали, які надходять, і оцінюються з заданою точністю їх амплітуди, початкові фази і затримки. На підставі цих даних приймач здійснює підстроювання циклічних зсувів опорних послідовностей відповідно до найбільш потужних компонентів вхідного сигналу. Після захоплення несучої частоти приймач обробляє пілот-сигнал, виділяючи з нього найпотужніші компоненти променів. Застосування пілот-сигналу і триканального Rake-приймача дозволило реалізувати у системі cdmaOne триразовий рознесений прийом з когерентним складанням сигналів.

На базовій станції cdmaOne використовуються просторове рознесення антен і двоканальний Rake-приймач з двома додатковими скануючими каналами. Це забезпечує (при наявності двох антен) восьмикратне рознесення.

1. 4 Модель багатопроменевого каналу

Багатопроменевий канал зі змінними параметрами можна представити у вигляді k паралельних передавальних гілок (з постійними

характеристиками - затримкою t_j в j -му промені і коефіцієнтом передачі цього променя $K_j(t)$, де $j = 1, 2, \dots, k$). Теоретично, кількість гілок в такій моделі нескінченна, але її можна обмежити кінцевим числом (наприклад, 6), враховуючи, що енергія вхідного сигналу поза заданої смуги частот зникаюче мала. Коефіцієнти $K_j(t)$ з різними індексами j корельовані між собою, однак коефіцієнт кореляції швидко зменшується зі зростанням різниці індексів гілок прийому. До сигналу на виході багатопроменевого каналу додається адитивна завада.

Існують два типи багатопроменевих каналів, які називють каналами «з пам'яттю» і «без пам'яті». Розмір «пам'яті» багатопроменевого каналу визначається тривалістю періоду між моментами прийому першого і останнього променя. Пам'ять каналу вважають «короткою», якщо вона значно менше тривалості елемента сигналу T , і «довгою», якщо вона порівнянна з цією тривалістю або більше її [4].

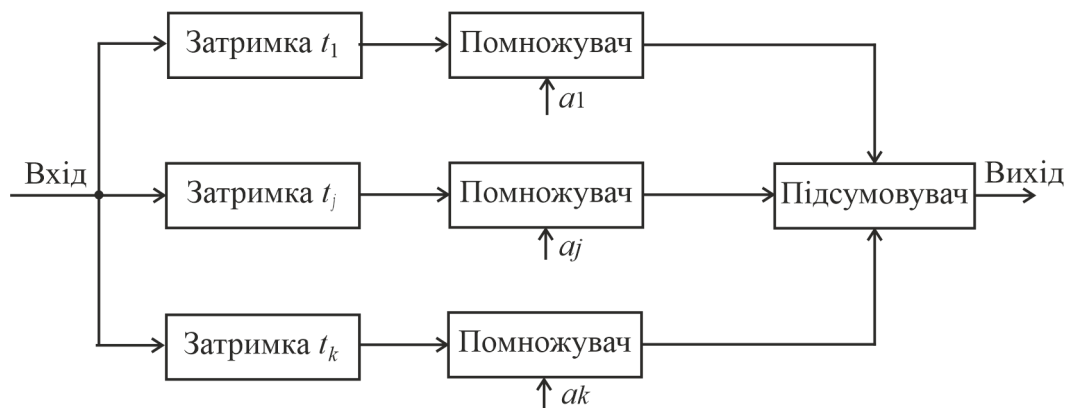


Рисунок 1.2 – Модель багатопроменевого каналу

Канал «без пам'яті» фактично являє собою радіоканал, в якому все перешкоди незалежні. Імовірність прийому сигналу по такому каналу залежить тільки від характеру спотворень при поширенні радіохвиль і від рівня перешкод, оскільки прийняття рішення здійснюється лише за час тривалості одного елемента сигналу.

У каналі «з пам'яттю» ймовірність прийому залежить від значення попередніх або наступних елементів прийнятого сигналу. Рішення приймається за час $T + L$, де L - кінцева пам'ять каналу, що називають часом реакції каналу.

1.5 Боротьба з завмираннями у рухомому зв'язку

Швидкі завмирання (short-term fading). Швидкі зміни обвідної сигналу, що утворюються в результаті інтерференції кількох копій одного і того ж сигналу в точці прийому. Ці копії мають різні амплітуди, початкові фази, затримки і доплерівські зсуви частоти. Значення обвідної сигналу зазвичай розподілені по релеєвському закону.

Часове рознесення (time diversity). Метод рознесення, при використанні якого один і той же сигнал передається декілька разів через часові інтервали, значно більші часу когерентності. Техніка часового рознесення заснована на поєднанні поблочного перемеження і методів завадостійкого кодування.

Часові селективні завмирання (time-selective fading). Вид завмирань, при яких характеристики каналу зв'язку змінюються з плином часу. Спотворення в каналі починають проявлятися, коли тривалість інформаційної посилки перевищує величину інтервалу часової когерентності. Для близько розташованих відліків часу коефіцієнт взаємної кореляції високий, а для відліків на границях інтервалу когерентності - низький.

Час когерентності (coherence time). Відрізок часу, протягом якого сигнали можуть розглядатися як когерентні. Межі інтервалу характеризуються мінімально допустимим значенням коефіцієнта кореляції, який служить для визначення ефективності використання способу часового рознесення. Оскільки час когерентності в каналі із завмираннями залежить від розкиду доплерівської частоти, то при малій швидкості переміщення рухомого об'єкта забезпечувати оптимальне значення коефіцієнта кореляції

(рівне 0,7) стає складно. Тому часове рознесення в «чистому вигляді» використовується вкрай рідко.

Виграш від рознесення (diversity gain). Відношення рівня сигналу, отриманого в системі зі складанням рознесених сигналів, до рівня сигналу, прийнятого по одному каналу системи без рознесення.

Гладкі завмирання (flat fading). Завмирання, при яких амплітуди всіх частотних складових і зсув початкової фази сигналу змінюються випадковим, але приблизно однаковим чином, а розкид по затримці менше, ніж $1/F$ (F - смуга частот сигналу, що передається).

Глибина завмирань (fading depth). Різниця між максимальним і мінімальним значеннями обвідної сигналу при завмираннях. У каналах наземного зв'язку глибина швидких завмирань зазвичай не перевищує 25-30 дБ, а повільних - 10-15 дБ.

Завмирання (fading). Флуктуації рівня радіосигналу в процесі поширення радіохвиль, обумовлені зміною параметрів середовища передачі. При однако-вих умовах поширення завмирання можуть бути гладкими, якщо передані сигнали є вузькосмуговими, і селективними - при широкосмугових сигналах.

Запас на завмирання (fade margin). Величина, на яку може бути знижений рівень сигналу в каналі без завмирань за умови, що в цьому випадку забезпечується такий же показник якості, як в каналі із завмираннями. Зазвичай запас оцінюється у відсотках якісно прийнятих сигналів [4].

Зона рознесеного прийому (diversity area). Зона, в якій здійснюється одночасний прийом сигналів від різних джерел, наприклад від декількох базових станцій.

Канал рознесеного прийому. 1. branch. Будь-який з каналів приймача рознесених сигналів в системах з просторовим або частотним рознесенням сигналів. 2. finger. Канал RAKE-приймача, призначений для виділення одного з компонентів багатопроменевого сигналу.

Кратність рознесення (order of diversity). Один з основних показників ефективності роботи приймача в каналах з завмираннями, чисельно дорівнює кількості еквівалентних каналів при явному рознесенні.

Лінійне додавання (equal gain combining). Метод рознесення, при використанні якого сигнали різних каналів приводяться до одного рівня, а потім здійснюється їх лінійне додавання.

Макрорознесення, макроскопічне рознесення (macrodiversity, macroscopic diversity). Метод боротьби з завмираннями, зумовленими затіненням сигналів. При його використанні інформація передається по різних маршрутах, що дозволяє обійти перешкоди, розташовані всередині зони. Приставка «макро» свідчить про те, що для забезпечення декорреляції сигналу необхідно здійснити рознесення на відстань, багато більшу довжини хвилі.

Повільні завмирання (slow fading). Повільні зміни обвідної, які виникають, якщо довжина шляху поширення радіохвилі змінюється на величину, істотно більшу, ніж довжина хвилі (наприклад, при переміщеннях мобільних абонентів). Повільні завмирання зручно описувати нормальним логарифмічним законом розподілу миттєвих значень обвідної радіосигналу.

Міжсимвольна інтерференція, MCI (intersymbol interference, ISI). Паразитний ефект, пов'язаний з «перекриттям» по тривалості сусідніх символів в каналі з багатопроменевим поширенням радіохвиль. Міжсимвольні спотворення виникають, коли максимальний часовий зсув копій сигналів в різних променях перевищує тривалість переданого символу T .

Мікрорознесення (microdiversity). Метод рознесення, заснований на використанні частотного, часового або мікропросторового рознесення (на довжину хвилі або менше). Виграш від мікрорознесення залежить від методу обробки рознесених сигналів. В даний час набули широкого поширення прийом з автовибором, складання по максимуму відношення сигнал/шум і застосування RAKE-приймачів.

Багатопрореневе рознесення (path diversity). Метод неявного рознесення, при використанні якого передавач випромінює один сигнал, а в точку прийому внаслідок багатопрореневого поширення радіохвиль приходять одночасно декілька копій сигналів.

Багатопрореневе поширення (multipath propagation). Поширення радіохвиль від передавача до приймача одночасно по декількох шляхах.

Багатопрореневий сигнал (multipath signal). Сигнал, який приходить від передавача в точку прийому по різних шляхах (променях) і являє собою декілька копій сигналів із зсувом за часом і з різними амплітудами, початковими фазами і доплерівськими зсувами частоти.

Неявне рознесення (implicit diversity). Сигнал передається тільки один раз, однак за рахунок його декореляції в каналі з багатопрореневим поширенням він розділяється на декілька променів.

Оптимальне додавання (maximum ratio combining). Метод рознесенного прийому, при використанні якого сигнали різних каналів складаються з урахуванням їх вагових коефіцієнтів, а коефіцієнти підсилення в кожному каналі прямо пропорційні середньоквадратичному значенню потужності сигналу і обернено пропорційні середньоквадратичному значенню потужності шуму в цих каналах.

Поляризаційне рознесення (polarization diversity). Метод просторового рознесення, в разі застосування якого сигнали передаються або приймаються в двох ортогональних площинах поляризації (вертикальної або горизонтальної).

Розкид по доплерівській частоті (doppler spread). Ширина смуги частот, в якій спектр доплерівського сигналу відрізняється від нуля.

Розкид по затримці (delay spread). Час, протягом якого рівень сигналу відрізняється від нуля і достатній для вимірювання.

Рознесення (diversity). Метод боротьби з завмираннями, заснований на утворенні декількох копій сигналу, що несуть одну і ту ж інформацію.

Відстань когерентності (coherence distance). Мінімально допустима відстань, на яку повинні бути рознесені антени в просторі, щоб сигнали, що приймаються були декорельовані, тобто коефіцієнт їх взаємної кореляції не перевищував граничного значення.

Релеєвський канал (Rayleigh channel). Канал, рівень сигналу в якому змінюється випадковим чином, а фаза - по закону рівномірного розподілу.

Швидкість завмирань (fading rate). Число перетинів в одиницю часу обвідної сигналу заданого постійного рівня.

Додавання рознесених сигналів (diversity combining). Процедура об'єднання двох або більше сигналів, що поширюються по різних трасах і переданих на різних частотах, яка дозволяє підвищити відношення сигнал/шум.

Додавання з автовибором (selection combining). Метод рознесенного прийому, при використанні якого з декількох сигналів, що надійшли в точку прийому по різних шляхах, вибирається найбільш потужний.

Таймер завмирань (fade timer). Таймер, який встановлений на мобільній станції і забезпечує контроль за безперервністю сигналу від базової станції.

Частотне рознесення (frequency diversity). Метод боротьби з завмираннями, при використанні якого для передачі сигналу задіюються дві або більше несучі частоти. Виграш забезпечується при величині розносу між частотами, що перевищує смугу когерентності. Широкопasmові методи передачі сигналів, такі як spread spectrum і frequency hopping, також підтримують частотне рознесення [5].

Частотно-селективні завмирання (frequency selective fading). Вид завмирань, при якому кожна частотна складова сигналу передається зі своєю амплітудою і зсувом початкової фази, а розкид по затримці порівнюємо зі значенням $1/F$ (F - смуга частот сигналу, що передається) або перевищує його.

1.6 Спотворення сигналу у каналі передачі

В останні роки широкий розвиток отримала статистична радіотехніка, що пояснюється необхідністю вивчення явищ при передачі повідомлень в умовах, коли наперед відомий опис сигналів неможливий. Статистична радіотехніка розглядає питання приймання сигналів в шумах і базується на апараті теорії ймовірностей і випадкових процесів. Випадкова зміна параметрів корисних сигналів обумовлено впливом на них дестабілізуючих факторів, таких, як випадковий характер модуляції, нестабільність частоти, тощо. Такий же вигляд мають і шуми. При статистичному підході до цієї проблеми не обов'язково визначати точний результат одного дослідження, а можна ґрунтуватися на аналізі багатьох дослідів і знайти закономірності, що характеризують випадковий процес в середньому. Початок застосування статистичних методів до проблем прийому сигналів в присутності шумів поклав С. Райє. Важливе значення в радіотехніці, поряд з вузькосмуговими, мають широкосмугові сигнали. До них відносяться і шумоподібні сигнали, звані так через близькість їх спектру до білого шуму [5].

Відмінною рисою випадкового сигналу є те, що його миттєві значення заздалегідь не передбачувані. Випадковий сигнал являє випадкову функцію часу, і його розгляд в області часу, як і детермінованого сигналу, є найбільш наочним. Разом з тим, якщо детермінований сигнал однозначно описується функцією часу, то таке подання випадкового процесу неможливо.

Значення випадкових сигналів не можуть бути обчислені достовірно. Однак, вивчаючи такий випадковий сигнал детально, можна помітити, що ряд його характеристик достантьо точно описується в імовірнісному сенсі. Важливо і те, що найчастіше спостерігають відносно невеликі відхилення амплітудних значень випадкового сигналу від деякого середнього рівня; чим більше відхилення за абсолютним значенням, тим рідше їх спостерігають. Уже в цьому проявляється статистична закономірність. Маючи в своєму

розпорядженні відомості про можливості флуктуації різного рівня, вдається створити математичну модель випадкового коливання, прийнятну для детального аналізу випадкового процесу.

У загальному випадку в радіотехніці і теорії зв'язку існують два основних класи сигналів, які потребують імовірнісного опису. По перше, практично випадковими є всі реальні сигнали, що несуть інформацію, тому для опису закономірностей, властивих осмисленим повідомленнями, застосовують імовірнісні моделі. По-друге, шуми – хаотично змінювані в часі електромагнітні коливання, що виникають в різних фізичних системах через випадковий рух носіїв заряду.

За структурою і характером випадкові процеси різноманітні, тому потреба у вивченні їх властивостей привела до розвитку ряду специфічних методів їх аналізу.

Випадкові процеси бувають безперервними і дискретними. Прикладом безперервного випадкового процесу є шум в радіотехнічному кола. Безперервний шум (одна його реалізація – діаграма в області часу) може мати будь-яке значення з області можливих.

Дискретний випадковий процес приймає тільки певні значення. Як склалося на практиці, дискретними будемо також називати випадкові процеси, що отримані при дискретизації безперервних випадкових процесів в часі. Такі випадкові процеси представляють послідовність імпульсів, амплітуди яких відповідають миттєвим значенням вихідного безперервного випадкового процесу. Прикладом такого процесу є коливання на виході ідеального обмежувача при подачі на його вхід безперервного випадкового процесу. Можливий випадковий процес змішаного типу, наприклад випадковий процес на вході детектора приймача (рис. 3.1, в). Окремо слід виділити імпульсні випадкові процеси.

З усього можливого різноманітних випадкових процесів виділимо лише ті, які найбільш часто зустрічаються в інженерній і дослідницькій практиці, і проведемо їх класифікацію за основними ознаками. Така класифікація

дозволяє визначити місце кожного виду випадкового процесу серед можливого їх різноманіття і ввести усталену в радіотехніці термінологію, яка буде використана в подальшому. Підкреслимо і такий рідко згадуваний момент - випадковий вигляд корисних інформаційних сигналів можна розглядати як стохастичний процес, протягом якого залежить від випадку і для якого визначена ймовірність того чи іншого випадку його протікання. Очевидно, що стохастичні випадкові процеси більш передбачувані, ніж просто випадкові. наприклад, можна заздалегідь знати або передбачити несучу частоту або діапазон частот переданого сигналу.

Обмеження смуги пропускання спотворюють спектр сигналу.

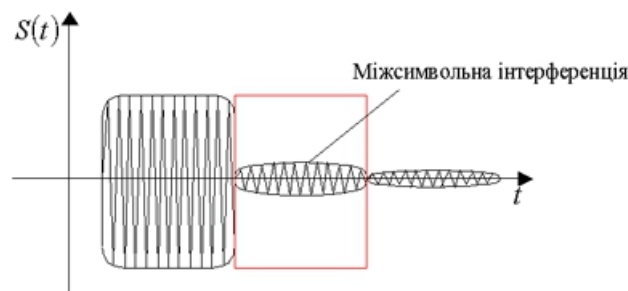


Рисунок 1.3. – Сигнал на виході каналу зв'язку

Вхідний сигнал має спектр $S(\omega)$ та частотну характеристику $H(\omega)$: $S_y(\omega) = S_x(\omega)H(\omega)$. Частотна характеристика каналу зв'язку може бути задана амплітудно-частотною (АЧХ) – $|H(\omega)|$ та фазо-частотною характеристиками (ФЧХ):

$$\varphi(\omega): |H(\omega)|\exp(-j\varphi(\omega)).$$

В цьому випадку можна використовувати коректор - пристрій, що вносить передспотворення з потрібною частотною характеристикою $G(\omega)$. Результуюча частотна характеристика каналу $H_i(\omega)$, де можуть бути усунені спотворення сигналів

$$H_p(\omega)G(\omega) = H_i(\omega)$$

Ідеальної корекції частотної характеристики каналу досягти на практиці не вдається, тому має місце деяка похибка:

$$\varepsilon(\omega) = H_i(\omega) - G(\omega)H_p(\omega)$$

Останнім часом для таких цілей стали застосовувати поліноміальні коректори з частотними характеристиками виду:

$$G(\omega) = \sum_{k=1}^n g_k \psi_k(\omega); \quad \psi_k(\omega)\psi_j(\omega) = \begin{cases} 1, & k = j \\ 0, & k \neq j \end{cases}$$

де $\psi_k(\omega)$, $k = 1, 2, \dots, n$ – опорні функції; g_k – параметри розкладу.
Структурна схема коректора наведена на рис. 1.4 [5].

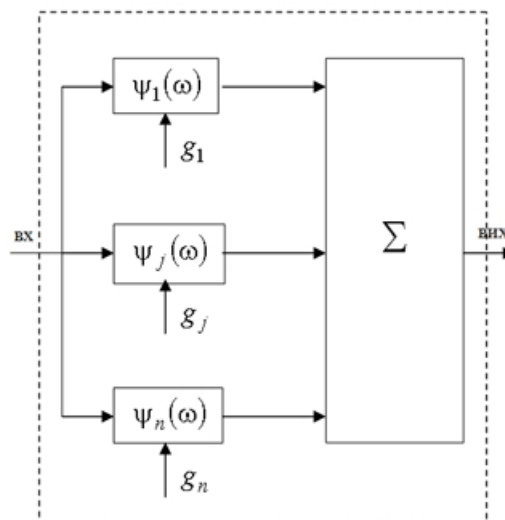


Рисунок 1.4 – Пристрій корекції частотної характеристики каналу

Якби складність реалізації не враховувалась, то вказаний показник точності, а також відповідна похибка корекції лінійних спотворень сигналів в каналу зв'язку досягли б нульового значення.

Висновки до першого розділу

1. Одним з найбільш ефективних методів боротьби з багатопроблемними завадами є рознесення сигналу. Виграш від рознесення прийому досягається лише в тому випадку, якщо сигнал, що потрапляє по декількох незалежних шляхах в точку прийому, має приблизно однакову середню потужність променів.

2. Принцип дії Rake-приймача, який був створений для прийому рознесених сигналів, заснований на роздільній обробці всіх багатопроблемних компонентів і обчисленні їх середньозваженої суми.

3. Багатопроблемний канал передачі зі змінними параметрами можна представити у вигляді k паралельних передавальних гілок

2. ОЦІНКА КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Шкідливі впливи у каналах зв'язку

Канал зв'язку є найважливішою та невід'ємною частиною будь-якої телекомунікаційної системи. У каналі зв'язку сигнал $A(t)$ має природне загасання (ослаблення) і штучне підсилення. Відомо, що передачу сигналів без спотворень забезпечує лінійна система з рівномірною амплітудно-частотною та лінійною фазо-частотною характеристиками в смузі частот сигналу. Очевидно, що сформульовані умови для реальних каналів в переважній більшості випадків не виконуються. Тому в процесі передачі сигнал $A(t)$ спотворюється. Ослаблений і спотворений сигнал на виході каналу зв'язку позначимо $Z(t)$ (рис. 1.1). У загальному вигляді вплив каналу зв'язку (як сукупності технічних засобів і середовища поширення) на корисний сигнал $A(t)$, що полягає в його ослабленні і спотворенні, може бути виражений оператором: $y(t) = V_y[A(t)]$, де V_y - символ оператора, що математично описує перетворення сигналу $A(t)$ у процесі його проходження через канал зв'язку.

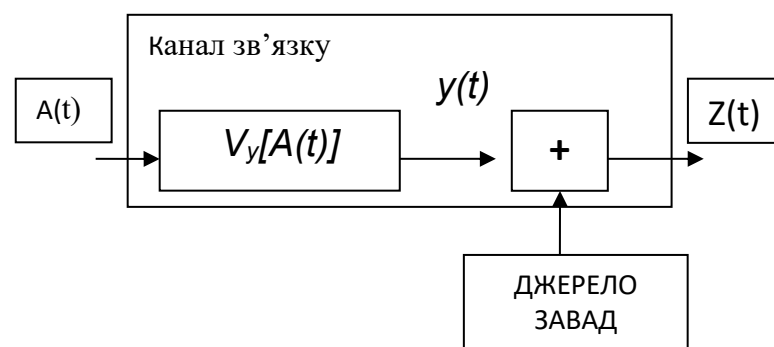


Рисунок 2.1 – Проходження сигналу через канал зв'язку

Цей оператор може бути як лінійним, так і нелінійним. Конкретний його вид визначається технічною структурою апаратури і властивостями

середовища поширення. При розповсюдженні в каналі зв'язку корисний сигнал може спотворюватися під дією багатьох факторів (рис. 1.2), які, поділяються на шуми, завади, завмирання та спотворення [6].

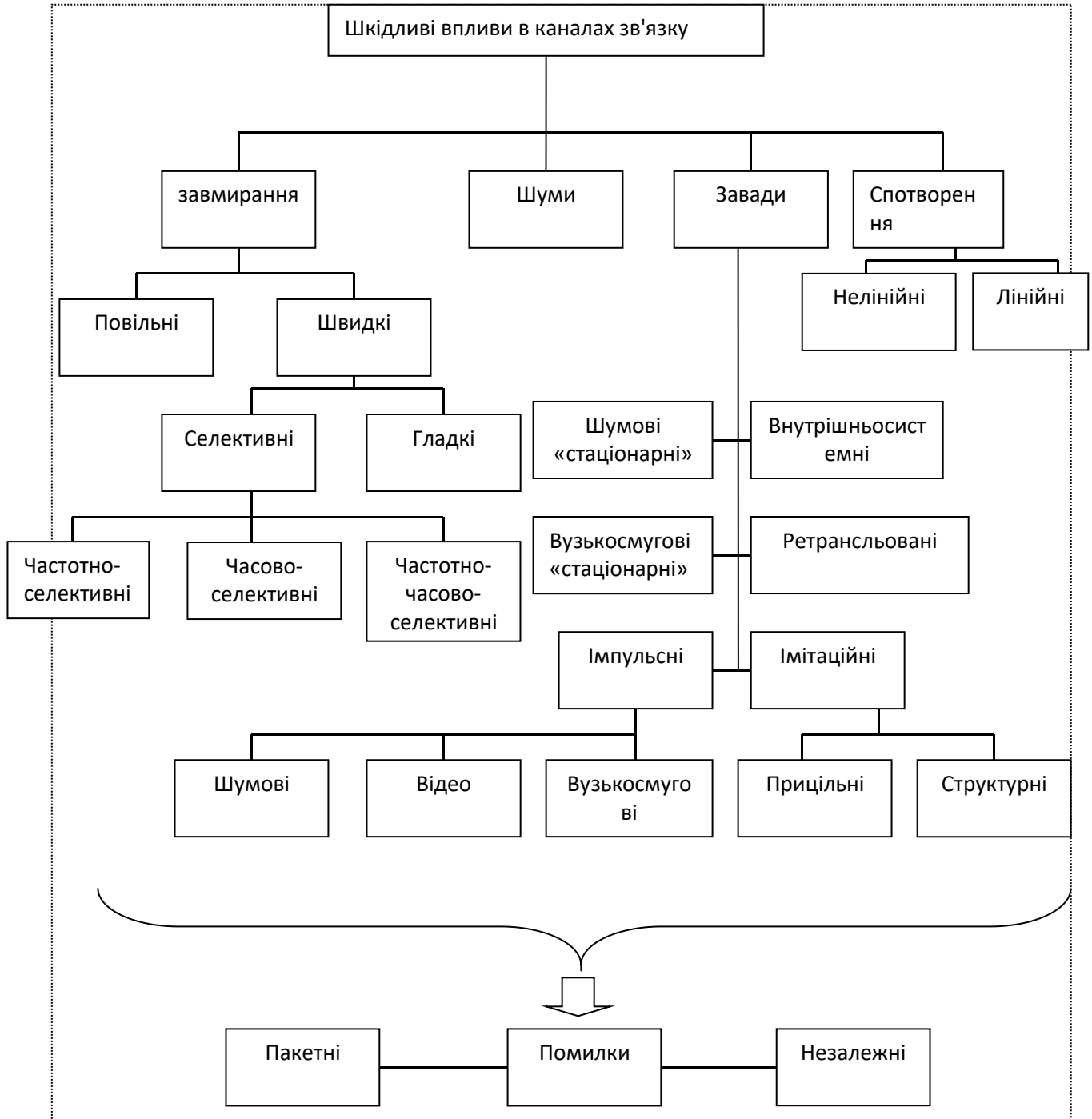


Рисунок 2.2 – Класифікація шкідливих впливів у каналах зв'язку

Основним негативним наслідком шкідливих впливів в каналі зв'язку для цифрових систем передачі є помилки.

2.2 Підвищення енергетичної ефективності систем зв'язку

Для оцінки ефективності систем радіозв'язку (СРЗ) необхідно мати кількісні показники ефективності. В теорії передачі інформації в якості такого показника використовувалася швидкість передачі інформації. Однак така міра оцінки не є задовільною, оскільки вона враховує лише витрати часу і не враховує витрат смуги частот і потужності сигналу.

В теорії завадостійкості оптимізація приймальної частини цифрової системи передачі інформації здійснюється на основі критерію мінімуму ймовірності помилки. Однак на підставі методів теорії завадостійкості вдається оптимізувати досить строго і повно лише алгоритми обробки сигналу при прийманні. Вирішити завдання вибору оптимального закону модуляції і, особливо, оптимального кодування на базі цієї теорії не вдається. Критерій мінімуму ймовірності помилки є досить повним для систем без кодування. У цих системах оптимізація фактично зводиться до оптимізації модему. У системах з кодуванням завдання істотно ускладнюється. Тут у формуванні та обробці сигналу важлива роль приділяється кодекам. Основним показником якості таких систем стає швидкість передачі, при якій забезпечується задана ймовірність помилки.

Сучасні складні системи зв'язку не завжди можуть бути охарактеризовані одним показником. Оцінка за декількома показниками є більш повною і більш конкретною та дозволяє охарактеризувати різні властивості системи. Оптимізація системи передачі в цілому, тобто з урахуванням пристроїв кодування і декодування, здійснюється на основі теорії інформації, основи якої розроблені К.Шенноном.

Основними шляхами підвищення завадостійкості є наступні.

1. Вибір в якості робочого такого діапазону хвиль, в якому вплив завад мінімальний. Звичайно, це діапазон дециметрових або більш коротких хвиль.

2. Покращення енергетики радіоліній, тобто збільшення відношення сигнал/завада за рахунок підвищення енергетики сигналу (збільшення потужності передавача), що вимагає значних енергетичних або матеріальних витрат, а також ускладнює електромагнітну сумісність своїх радіозасобів.

3. Застосування в СРЗ завадостійких принципів просторово-часової обробки сигналів:

- вибір виду модуляції і принципів демодуляції сигналу;
- застосування коригувальних кодів;

- застосування каналів з різного роду зворотним зв'язком. Останній може бути з інформаційним - деяким аналогом мажоритарного методу з багатократною передачею інформації і ухваленням рішення щодо правильності передачі на боці передавача, або з вирішальним зворотнім зв'язком шляхом багатократної, при необхідності, передачі з ухваленням рішення щодо правильності передачі на стороні приймача .

В сучасних системах радіозв'язку широко використовується один із методів формування ширококутових сигналів - метод ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (OFDM). Ідея OFDM полягає в тому, що потік переданих даних розподіляється по множині частотних підканалів і передача ведеться паралельно у всіх цих підканалах. При цьому висока швидкість передачі досягається саме за рахунок одночасної передачі даних по всіх підканалах, а швидкість передачі в окремому підканалі може бути і невисокою. Нова технологія передачі в цей час розглядається як одна з найбільш перспективних для побудови ширококутових систем цифрового радіозв'язку багатопроменевими каналами, що забезпечує досить високу частотну ефективність цих систем. Основними перевагами даної технології є відносно висока стійкість щодо частотно-селективних завмирань і вузькосмугових завад, а також висока спектральна ефективність [7].

2.3 Передача та обробка сигналів з OFDM

Технологія ортогональної частотної модуляції дозволяє забезпечити більш високі швидкості передачі інформації каналами зв'язку із замираннями у порівнянні з відомими методами передачі сигналів. Основна особливість OFDM сигналів - їх інваріантність до явища багатопроменевості в каналі. Однак цим системам властиві свої недоліки.

Однією з головних проблем, що пов'язана з використанням OFDM-сигналів є високий пік-фактор. Виділяють три основних напрямки вирішення даної проблеми. Перший та найпростіший - амплітудне обмеження сигналу, що дозволяє суттєво знизити величину пік-фактора. Але при цьому виникають неконтрольовані спотворення сигналу, що призводить до погіршення якості зв'язку та зростання рівня позасмугового випромінювання. Виправляють ці недоліки за допомогою додаткової фільтрації, яка знову призводить до збільшення пік-фактора.

Другим напрямком є додаткове кодування та введення надлишкових несучих, корекція параметрів яких дозволяє зменшити значення пік-фактора. При цьому погіршується спектральна ефективність, оскільки суттєве зменшення пік-фактора спостерігається тільки при швидкості кодування $1/2$, тобто половина несучих частот використовується для корекції.

Третій напрямком використання додаткових ортогональних (або неортогональних) перетворень, а також використання крім Фур'є-базису інших ортогональних базисів (Hadamard Basis, Wavelet-Basis та ін.). Недоліком усіх цих підходів є спотворення структури OFDM-сигналу, що призводить до того, що сигнал стає не інваріантним по відношенню до циклічних зсувів, тобто чутливим до багатопроменевості каналу.

Дослідження показують, що проблема зменшення пік-фактора повинна вирішуватись комплексно, з урахуванням характеристик якості та рівня позасмугового випромінювання.

Було розроблено алгоритм формування OFDM-сигналу з мінімально можливим значенням пік-фактора при заданій (контрольованій) величині спотворення сигналу, заданому рівні позасмугового випромінювання та фіксованій кількості надлишкових частот. Моделювання алгоритму показало, що його використання дозволяє зменшити пік-фактор на 5-7 дБ, при контрольованому зниженні завадостійкості на 0,25- 0,5 дБ та збільшенні рівня позасмугового випромінювання не більше ніж на 4 дБ.

Розглянемо нелінійні спотворення в радіотракті СРЗ. Сума великої кількості незалежних ортогональних підканалів у системі OFDM породжує високий рівень паразитної амплітудної модуляції, що вимагає підсилювача потужності (ПП) з високою лінійністю характеристики. Спотворення такого роду особливо небезпечні для промодульованих за амплітудою сигналів (сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією, амплітудно-фазовою модуляцією). Параметри радіотракту значно впливають на дальність та якість зв'язку, пропускну спроможність системи. Тому правильний вибір характеристик радіотракту є досить важливим завданням.

Розглянемо помилки синхронізації. Ще одним недоліком технології OFDM є чутливість до помилок синхронізації внаслідок нестабільності фазової характеристики каналу та фазових флуктуацій генераторів, характеристик синтезаторів та змішувачів на передавальному та приймальному боці, номіналів частот. У результаті виникає випадковий фазовий зсув, що призводить як до однакового для всіх підканалів обертання сигнального сузір'я, так і до появи міжканальної інтерференції. Слід зазначити, що компенсація першої складової вимагає оцінювати фазовий шум один раз за символ, другої - частіше одного разу.

Оцінювання параметрів сигналу. Ефективність характеристик завадостійкості будь-якої системи зв'язку залежить від точності оцінювання параметрів сигналу і каналу. В OFDM-системах для цього застосовуються пілот-вставки. Причому зручність OFDM-сигналу полягає в тому, що він дозволяє здійснювати безперервну за часом передачу пілот-сигналів на

різних частотах (scattered pilot) і оцінювати стан каналу для всіх частот з урахуванням кореляції завмирань частотних каналів. Однак при цьому зменшується пропускна здатність системи. Тому кількість вставок прагнуть зменшити, що, у свою чергу, призводить до погіршення точності оцінювання і, отже, до збільшення ймовірності помилки при демодуляції та декодуванні. Дослідження показали, що шляхом оптимального комбінування результатів обробки пілотної і інформаційної частин OFDM-сигналу можна істотно зменшити кількість пілот-вставок і наблизитися до потенційних характеристик завадостійкості.

Шкідливий вплив навмисних завад. При наявності завад, що діють на вході приймача OFDM-сигналу, відбувається погіршення завадостійкості приймання внаслідок наступних факторів:

- зменшення відношення сигнал/шум в усіх або декількох підканалах;
- спотворення форми сигналів;
- погіршення точності оцінювання каналу, а також частотної та часової синхронізації через вплив завад на пілот-сигнали.

Таким чином, при передачі і обробці сигналів з OFDM у системах радіозв'язку виникає ряд задач, основними з яких є необхідність урахування та компенсації впливу навмисних завад на завадостійкість приймання та необхідність точного оцінювання параметрів сигналу і каналу.

З огляду на сучасні наукові досягнення в області побудови СРЗ і досвід передових країн світу доцільно використовувати засоби радіозв'язку з ортогональною частотною модуляцією. Одним з перспективних напрямків підвищення енергетичної ефективності таких систем є оптимізація вибору параметрів сигналу та їх чисельних значень.

Системний підхід до дослідження завдань забезпечення заданих характеристик системи зв'язку показує необхідність підвищення енергетичної ефективності існуючих СРЗ, яка кількісно оцінюється коефіцієнтом використання потужності сигналу.

Завдання підвищення енергетичної ефективності визначимо як оптимізаційну задачу, цільову функцію та обмеження якої представимо наступним чином [8].

$$\begin{aligned} \beta_E &= F_1(v_i, \Delta F, M, n, R, d, P_c, N_A) \rightarrow \max; \\ P_{\bar{o}} &= F_2(P_c, M, n, R, d, N_A) \quad P_{\bar{o} \text{ доп}}; \\ v_i &= F_3(M, R, N_A) \quad v_i \text{ доп}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

де v_i - інформаційна швидкість, $P_{\bar{o}}$ - ймовірність помилки на біт, n - довжина кодової комбінації, P_c - потужність сигналу, M - розмірність ансамблю сигналів, R - швидкість коригувального коду, $R = k/n$, k - кількість інформаційних біт в кодовій комбінації довжиною n , d - величина кодової відстані, N_A - кількість активних піднесучих, ΔF - ширина спектра сигналу.

Проведений аналіз функціонування СРЗ показує, що метою роботи доцільно обрати підвищення енергетичної ефективності систем радіозв'язку в умовах впливу навмисних завад і частотно-селективних замирань за рахунок вибору оптимальних значень параметрів сигналу в залежності від стану каналу зв'язку.

Одними з основних вимог до сучасних СРЗ є забезпечення високої мобільності та завадозахищеності. Під мобільністю розуміють як максимально швидке розгортання/згортання та входження в зв'язок, так і забезпечення зв'язку в русі. При радіозв'язку з рухомими об'єктами, крім доплерівського зсуву частоти негативно впливають на якість передачі даних швидкі замирання, викликані ефектом багатопроменевості.

Для компенсації ефекту багатопроменевого розповсюдження радіохвиль, в сучасних СРЗ використовуються частотні еквалайзери. По суті еквалайзер (пристрій вирівнювання) є зворотнім фільтром каналу. Якщо канал є частотно-селективним, то еквалайзер підсилює частотні компоненти з малими амплітудами та ослаблює - з великими. Метою комбінування каналу та вирівнювального фільтра є отримання плоскої частотної характеристики

та лінійної зміни фази . Однак у міру зростання швидкості передачі даних або за рахунок збільшення символної швидкості, чи через ускладнення схеми кодування, ефективність використання еквалайзерів знижується. У стандарті 802.11b з максимальною швидкістю передачі 11 Мбіт/с при використанні комплементарних кодів схеми компенсації міжсимвольної інтерференції цілком успішно справляються з покладеним на них завданням, але при більш високих швидкостях такий підхід стає неприйнятним.

У загальному випадку вираз для OFDM-сигналу записується таким чином:

$$A_{\Sigma}(t) = A e^{j2\pi f_0 t} \prod_{l=1}^L \prod_{p=1}^N c_{lp} e^{j \frac{2\pi p}{T_0} (t - T_s - lT_c)}, \quad (2.2)$$

де c_{lp} - символ даних у кадрі на p -й піднесучій у складі l -го символу OFDM-сигналу; l - номер символу OFDM-сигналу; p - номер піднесучої; T_s - тривалість захисного інтервалу; T_c - тривалість OFDM-сигналу; T_0 - тривалість символу (або тривалість Фур'є-перетворення) у складі OFDM сигналу (рис.2.3). Тривалість захисного інтервалу T_s залежить від часової затримки радіохвиль, що приходять в точку прийому і повинна задовольняти умові: $T_s > \tau$, де τ - різниця в часі між прийманням основного променя сигналу і останньої його копії.

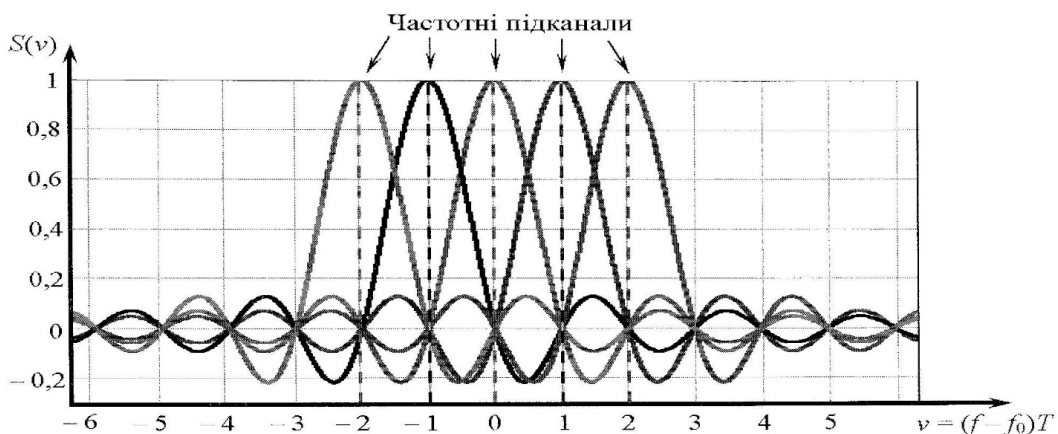


Рисунок 2.3 – Принцип ортогонального частотного розділення каналів

Оскільки підканали OFDM-сигналу є ортогональними, то спектральні характеристики визначаються сумою енергетичних спектрів всіх підканалів (рис. 2.3) [9].

$$S(f) = A^2 \sum_{p=1}^N \frac{\sin \pi \left(f - f_0 - \frac{p}{T_0} T_c \right)}{\pi \left(f - f_0 - \frac{p}{T_0} T_c \right)} \quad (2.3)$$

де f_0 - несуча частота.

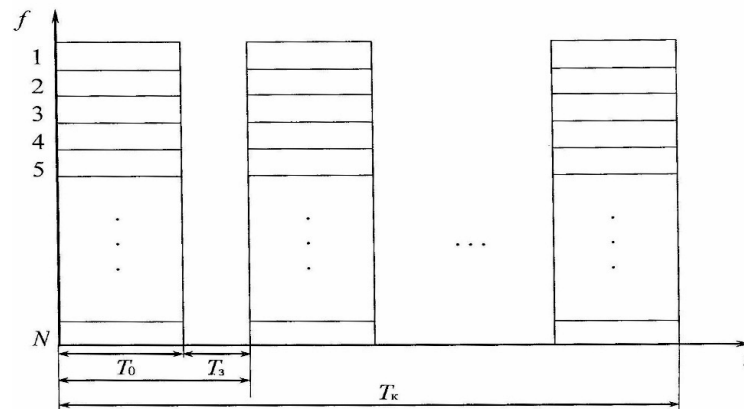


Рисунок 2.4 – Структура OFDM-сигналу

Сигнали з ортогональною частотною модуляцією розглядаються як альтернатива еквалайзерам при боротьбі з міжсимвольною інтерференцією (рис. 2.4). З погляду теорії застосування OFDM-сигналів еквівалентно застосуванню еквалайзера, реалізованого в частотній області. Еквалайзери, реалізовані в часовій області, істотно поступаються їм за складністю реалізації. На рис. 2.5 позначено: $M_{\text{мн}}$ - число операцій множення на один символ; τ_k - тривалість відгуку на виході каналу; T_0 - тривалість символу.

У системах радіодоступу зустрічаються різновиди сигналів OFDM: COFDM і OFDM. Сигнали COFDM використовують кодування інформації на

кожній піднесучій і між піднесучими. Завдястійке кодування дозволяє додатково підсилити корисні властивості OFDM-сигналу.

При передачі сигналів методом OFDM вираз (2.3) для групового сигналу модему на інтервалі передачі одного символу можна переписати:

$$A_{\Sigma}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A_p \cos \left(2\pi f_0 t + k - \frac{N-1}{2} \Delta f_p t + \varphi_p \right) \quad (2.4)$$

де f_0 - центральна частота групового сигналу; N - кількість піднесучих; Δf_p - рознесення частот між піднесучими; A_p - амплітуда p -ї піднесучої; φ_p - поточна фаза p -ї піднесучої.

Схематичне подання сигналу OFDM у частотній області показано на рис. 2.6. Амплітуди A_p і фази φ_p групового сигналу (2.3) визначаються характером модуляції та інформацією, що передається каналом зв'язку.

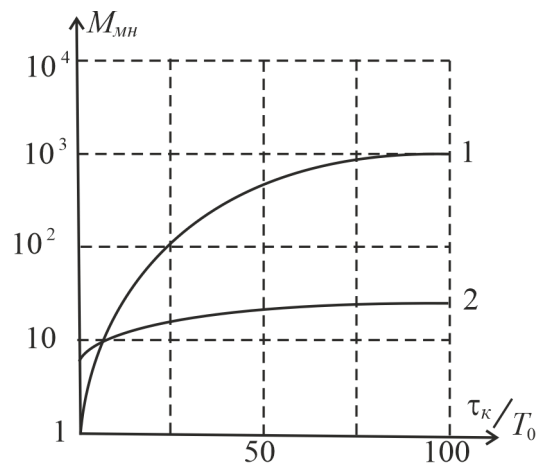


Рисунок 2.5 – Характеристика лінійного еквалайзера в часовій області (1) і еквалайзера в частотній області, або OFDM-сигнал (2)

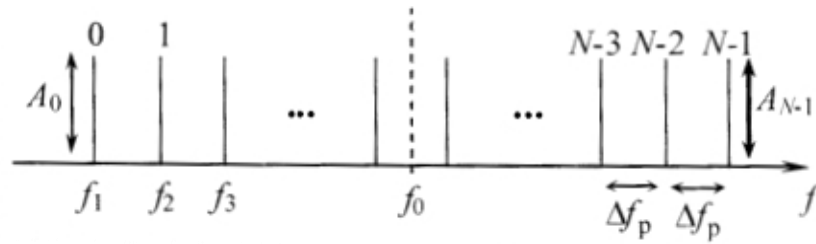


Рисунок 2.6 – Спектр сигналу OFDM

Рисунок 2.7 – Структура радіолінії з сигналами OFDM
(ДПФ – дискретне перетворення Фур'є)

2.4 Аналіз характеристик навмисних завад для систем радіозв'язку

Відповідно в системі радіозв'язку для кожного виду завади необхідно вибрати спосіб передачі повідомлення, що забезпечує задані характеристики системи (наприклад, інший вид передачі, направлену антену, дублювання напрямку декількома видами радіозв'язку і т.д.).

Для СРЗ найбільшу загрозу представляють навмисні завади, які може створювати противник. Ефект впливу навмисних завад проявляється в

погіршенні якості оброблюваної інформації в результаті її руйнування або старіння, що збільшує ступінь невизначеності при ухваленні рішень.

Впливаючи на приймальні пристрої, завади імітують або спотворюють спостережувані і реєстровані кінцевою апаратурою сигнали або зображення, затруднюють або виключають виділення корисної інформації, ведення радіопереговорів, знижують їх дальність дії і якість роботи систем управління. Під дією завад радіозасоби і системи можуть припинити передачу інформації, незважаючи на їх повну справність і працездатність.

Оскільки подавити різноманітні радіоелектронні засоби завадами одного виду неможливо, застосовують їх спеціальні види, призначені для подавлення конкретного виду зв'язку.

Більш того, для придушення засобів одного і того ж класу, але з використанням різних видів сигналів і способів їх обробки, застосовуються різні види завад. Тому виникає задача підвищення ефективності СРЗ, що функціонують в умовах впливу навмисних завад [9].

Заваду будемо називати найгіршою, якщо при відомих постановнику завад методах формування і обробки сигналу в системі радіозв'язку завада зменшує швидкість передачі інформації нижче за порогове значення та володіє при цьому мінімальною середньою енергією. Як відомо, існують оптимальні значення параметрів завад, при яких експоненціальна залежність ймовірності помилки від співвідношення сигнал/шум замінюється лінійною.

Для подавлення СРЗ можуть застосовуватися різні види організованих завад, що реалізуються у відповідних станціях завад (СЗ). Все різноманіття варіантів СЗ визначається в основному шляхами, якими їх розробники прагнуть сконцентрувати обмежену потужність передавачів в певних частотних діапазонах, часових інтервалах та просторових секторах. Метою постановника завад є розробка такої стратегії вибору завади, яка при загальній обмеженості потужності передавача завад P_z повинна забезпечити мінімізацію співвідношення сигнал/завада на виході приймача.

Найбільш універсальною і стійкою до різних способів підвищення завадостійкості СРЗ є шумова загороджувальна завада (рис. 2.8), моделлю якої є обмежений у смузі білий гаусовий шум з спектральною щільністю G_3 ,

$$G_3 = P_3/\Delta f_c \quad (2.5)$$

де Δf_c - ширина спектра сигналу.

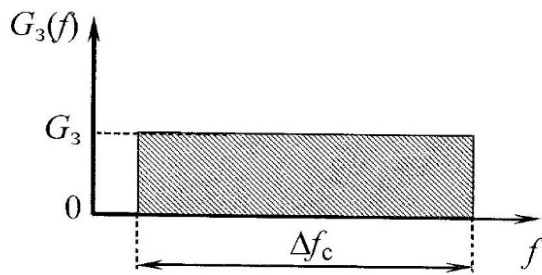


Рисунок 2.8 – Шумова загороджувальна завада

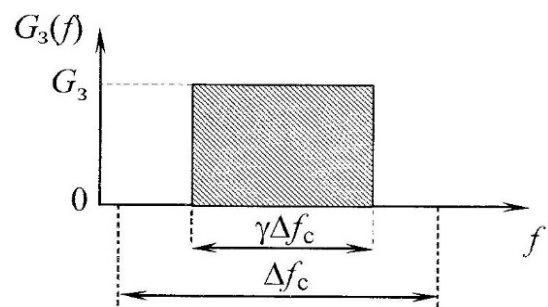


Рисунок 2.9 – Шумова завада в частині смуги

Завади у відповідь з погляду енергетичних можливостей є одними з найбільш ефективних для подавлення СРЗ. Наприклад, для СРЗ з ППРЧ їх ефективність не залежить від коефіцієнта виграшу, який має СРЗ за рахунок розширення спектру сигналів. Проте створення завад у відповідь для СРЗ з ППРЧ за порівняно короткий час передачі частотних елементів сигналу (стрибків частоти) нашоухується на технічні і організаційні труднощі.

Серйозною проблемою, з якою стикаються при створенні завад у відповідь, є не тільки обмеження за часом передачі завад, але і обмеження по потужності станції завад. Якщо одночасно перехоплюється декілька сигналів в різних частотних каналах, то СЗ вимушена або розподіляти свою потужність між цими сигналами рівномірно, або спробувати виділити сигнали тільки тієї СРЗ, що підлягає придушенню.

Потужність шумової завади може бути використана ефективніше за рахунок зосередження її в обмеженій смузі частот, значно меншій, ніж діапазон частот СРЗ, тобто за рахунок створення шумової завади в частині смуги (рис. 2.9).

2.5 Спотворення сигналу з OFDM при впливі навмисних завад

Фізичний зміст процесу функціонування системи радіозв'язку (СРЗ) в умовах організованих завад являє собою радіоелектронний конфлікт, в якому приймають участь з одного боку СРЗ, а з іншого - система РЕП, до складу якої, в загальному випадку, входять станція радіотехнічної розвідки (РТР) та, безпосередньо, станція завад (СЗ). В якості загального показника ефективності конфліктуючих сторін можна обрати середню ймовірність помилкового приймання на біт, як основну міру завадостійкості СРЗ.

Об'єктом досліджень при розробці моделі будемо вважати радіолінію з використанням модуляції багатьох несучих n з використанням в кожному підканалі чотирьохпозиційної фазової модуляції (ФМ-4).

Найбільш універсальною та стійкою до різних способів підвищення завадостійкості сигналів при прийманні є шумова загороджувальна завада, модель якої може бути подана обмеженим у смузі частот адитивним білим гаусівським шумом (АБГШ) з нульовим середнім та рівномірним розподілом спектральної густини потужності. На рис.2.10 зображено OFDM-сигнал та шумову загороджувальну заваду; якщо потужність сигналу завади P_3 на приймальному боці постійна, спектральна щільність потужності сигналу завади $G_3 = P_3/\Delta f$ ($\Delta f = f_2 - f_1$ - ширина спектру завади, яка співпадає з шириною спектра сигналу); E_{oi} - енергія сигналу в i -му підканалі.

Якщо припустити, що забезпечується ідеальна частотна синхронізація, нелінійні спотворення сигналу відсутні і ортогональність між піднесучими при проходженні каналу зв'язку не порушується, тоді піднесучі можна вважати незалежними між собою і завадостійкість для кожної окремої

піднесучої групового сигналу з OFDM можна розрахувати за відомими з теорії потенційної завадостійкості формулами.

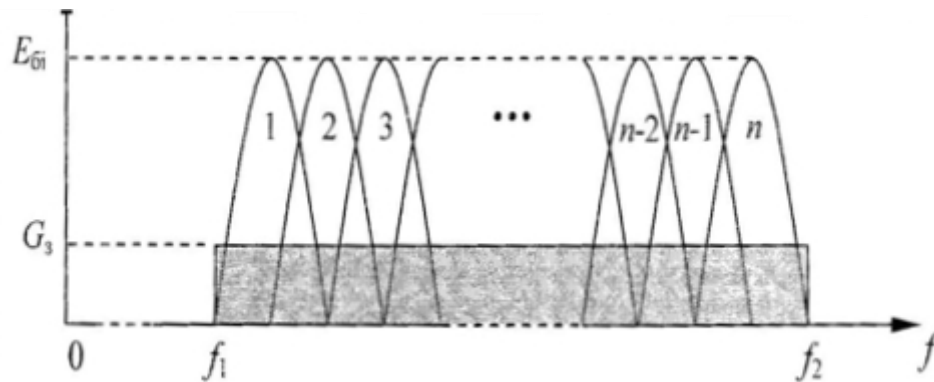


Рисунок 2.10 – Шумова загороджувальна завада в спектрі OFDM сигналу

Загальну ймовірність помилки P_{δ} для сигналу знайдемо як суму ймовірностей помилкового приймання по всіх піднесучих, враховуючи те, що швидкість передачі (а значить і кількість інформації, що передається) у кожному підканалі в n разів менша від загальної швидкості групового сигналу:

$$P_{\delta} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{\delta i}}{n}$$

Ймовірність помилкового приймання в окремому i -му підканалі OFDM можна визначити за виразом [13]:

$$P_{\delta} = \sum_{i=1}^n \frac{0,5 \cdot [1 - \Phi(\sqrt{2Q_i^2})]}{n}$$

На рис. 2.11 побудовано загальну залежність $P_{\delta} = f(Q_i^2)$ за умови, що значення Q_i^2 однакові для усіх піднесучих.

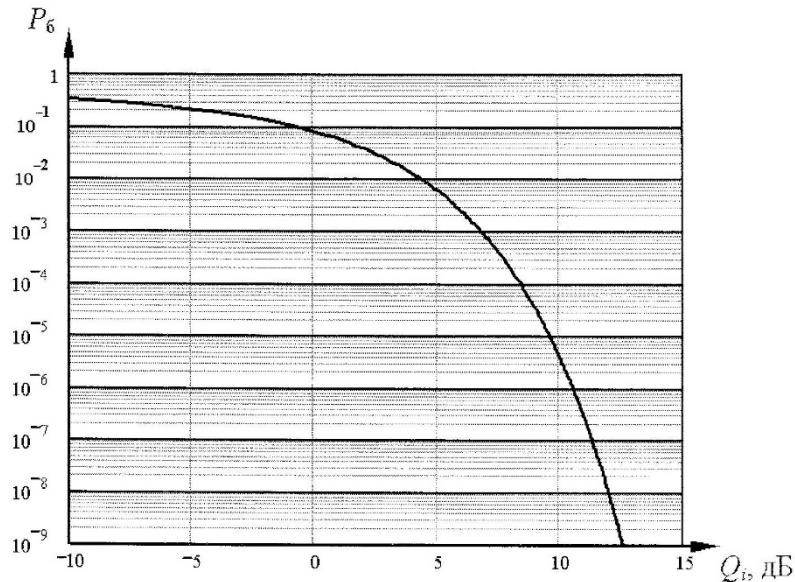


Рисунок 2.11 - Загальна крива завадостійкості радіолінії

Очевидно, що при достатньому енергетичному ресурсі станції завад у випадку постановки широкопasmової загороджувальної завади, яка перекриває весь спектр системи з багатьма несучими та створює спектральну щільність потужності завади G_z , яка збільшує ймовірність помилкового до недопустимого значення, єдиним виходом є перехід на іншу робочу частоту. Тобто у такому випадку СРЗ повинна діяти за класичним алгоритмом роботи частотно-адаптивної радіолінії, тобто уникати завади використовуючи перестройку робочої частоти за невідомим системі РЕП псевдовипадковим алгоритмом. Ведення радіозв'язку таким чином ще називають повільною ППРЧ, коли перестройка робочої частоти здійснюється зі швидкістю, що не перевищує технічну швидкість передачі в каналі (рис. 2.12) [10].

У випадку появи шумової завади в частині смуги, яка знижує ймовірність помилкового приймання в системі до недопустимого рівня, СРЗ може здійснити такі заходи для протидії:

- використання методів просторової компенсації завад;
- відключення, а точніше припинення передачі корисної інформації на тих піднесучих, в спектри яких потрапила завада і нарощування загальної

пропускної спроможності системи за рахунок підвищення інформаційної швидкості на кращих за співвідношенням сигнал-шум піднесучих;

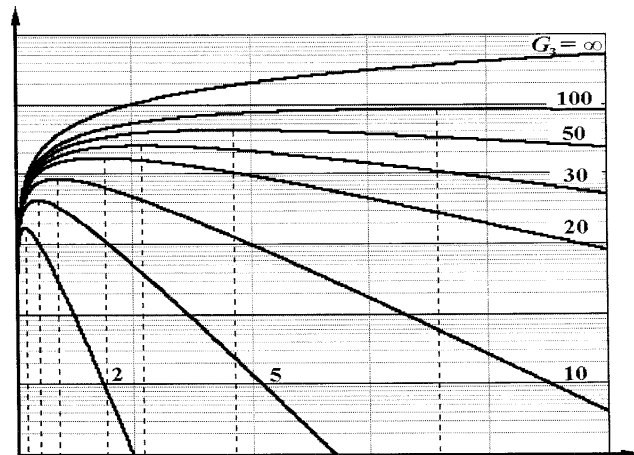


Рисунок 2.12 - Визначення оптимальної шумової завади в частині смуги

- перехід на іншу робочу частоту за умови, якщо перший та другий заходи виявляться неефективними.

Значення $\gamma_{\text{опт}}$ для відповідних значень середнього співвідношення сигнал/шум в підканалах Q_i^2 , що відповідають заданим G_3 , [мВт/Гц] на вході приймача, а також ймовірності помилки P_0 , наведені в таблиці 2.2. Причому, значення G_3 , наведені в таблиці, відповідають випадку $\gamma = 1$ (коли вся енергія завади розмивається по спектру сигналу).

Розглянемо порядок розрахунку $\gamma_{\text{опт}}$.

1. Формулювання аналітичного виразу для знаходження ймовірності помилкового приймання радіолінії:

$$P_0 = \sum_{i=1}^{n-m} f_i \frac{E_{0i}}{G_{0i}} + \sum_{j=1}^m f_j \frac{E_{0j}}{G_{0j} + G_3 / \gamma} \quad (2.6)$$

2. Знаходження максимуму функції (2.6). Диференціювання функції (2.16): $dP_0(\gamma) / d\gamma$. Взначення точки γ , де похідна дорівнює 0 і при переході

якої функція змінює знак з додатнього на від'ємний.

3. Підстановка даного значення γ у вираз (2.6) і знаходження ймовірності помилкового приймання, що відповідає $\gamma = \gamma_{\text{опт}}$

2.6 Оцінка впливу зсуву несучої частоти на якість OFDM сигналу

Технологія OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing - мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів) знайшла широке застосування в таких областях, як цифрове радіомовлення, цифрове телебачення високої якості, мобільні технології передачі даних, мобільні системи шірокопasmугового доступу і багато інших. В якості прикладу можна згадати такі популярні сучасні стандарти, як DRM, DVB, Long LTE, WiMAX [1-4]. OFDM має низку переваг, таких як висока завадозахищеність при передачі через канал з багатопроменевим поширенням, а також ефективне використання смуги каналу. Крім цього, OFDM має і недоліки, одним з яких є висока чутливість до зсуву несучої частоти.

Зсув несучої частоти сигналу може виникати через ефект Доплера при рухомому зв'язку і розбіжності частот опорних генераторів в передавачі і приймачі. У прийнятому сигналі $y[n]$ це викликає зсув фази:

$$y[n] = h[n]x[n]e^{j2\pi n\varepsilon/N} + w[n]$$

де $\varepsilon = f_\varepsilon / \Delta f$ - нормоване зміщення частоти несучої, яке дорівнює відношенню зсуву частоти несучої f_ε до відстані між підканалами Δf ;

$h[n]$ - імпульсна характеристика каналу;

$w[n]$ - адитивний білий гаусовий шум (АБГШ);

N - довжина символу у відліках.

При наявності зсуву частоти різниця фаз лінійно зростає з плином часу. При $\varepsilon > 0,5$ це призводить до того, що різниця фаз перевищує π в межах одного символу, в зв'язку з чим виникає фазова неоднозначність.

Вплив зсуву частоти на ε призводить до виникнення міжканальної інтерференції (МКІ) і втраті ортогональності. Це пов'язано з тим, що кожен підканал формується оберненим перетворенням Фур'є, яке має вигляд *sinc* функції і зсув частоти призводить до виникнення завад від сусідніх підканалів.

Представимо ε у вигляді двох частин: ε_i кратного відстані між підканалами і залишку ε_f :

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_f$$

При зсуві несучої частоти на ε_i не порушується ортогональність і, таким чином, не виникає МКІ, однак це робить демодуляцію неможливою, тому що неправильно витягується інформація з підканалів.

При дробовому зсуві ε_f прийнятий сигнал в частотній області може бути записаний виразом:

$$Y[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H[k] X[k] e^{j2\pi\varepsilon_f n/N} + \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} H[m] X[m] e^{j2\pi(m-k+\varepsilon_f)n/N} + W[k]$$

використовуючи вираз [11]

$$\sum_{n=0}^{N-1} a^n = \frac{1-a^N}{1-a}$$

і формулу Ейлера, отримуємо:

$$Y[k] = e^{j\pi\varepsilon_f(N-1)/N} \left\{ \frac{\sin(\pi\varepsilon_f)}{N \sin(\pi\varepsilon_f/N)} \right\} H[k] X[k] + e^{j\pi\varepsilon_f(N-1)/N} \sum_{m=0}^{N-1} \frac{\sin(\pi(m-k+\varepsilon_f))}{N \sin(\pi(m-k+\varepsilon_f)/N)} H[m] X[m] e^{j\pi(m-k)(N-1)/N} + W[k] \quad (2.7)$$

Перший член в останньому рядку рівняння (1) являє собою спотворення амплітуди і фази k -го підканалу внаслідок дрібного зміщення несучої. Також через зсув на не цілу ширину підканалу порушується ортогональність між підканалами і виникає інтерференційна завада. Згідно з центральною граничною теоремою МКІ в рівнянні (1) моделюється як гаусовий шум, оскільки є результатом додавання N випадкових величин від кожного підканалу, де N - кількість підканалів, яке, як правило, велике. Виходячи з рівняння (1), потужність МКІ, що впливає на підканал k , може бути описана наступним виразом [10]:

$$\sigma_I^2 = \sigma_A^2 \frac{1}{N^2} \frac{\sin^2(\pi(m-k+\varepsilon_f))}{\sin^2 \frac{\pi}{N}(m-k+\varepsilon_f)}$$

Вплив зсуву несучої, що не кратна ширині підканалу призводить до різкого збільшення бітової помилки (bit error rate – BER), на виході демодулятора. При проектуванні систем зв'язку на основі OFDM необхідно визначити максимально можливу допустиму похибку в оцінці та корекції частотного зсуву.

Визначити величину максимального погіршення ВСІШ (відношення сигнал/шум) $\Delta\gamma_{\max}$ для кожного конкретного його значення γ в каналі АБГШ при заданій величині ε_f можна за допомогою співвідношення:

$$\varepsilon_f < \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\gamma} \left(1 - \frac{1}{\Delta\gamma_{\max}}\right)} .$$

Навіть невелике ε_f викликає суттєве погіршення якості сигналу.

Крім цього, серйозність такого роду спотворень викликана ще й тим, що неможливо знизити їх рівень або повністю усунути простим збільшенням потужності передавача, оскільки джерелом завад є сам сигнал.

Тому при проектуванні необхідно враховувати максимально допустиме погіршення ВСШ каналу, викликане помилками синхронізації.

Висновки. Технологія OFDM має ряд переваг і недоліків, одним з яких є висока чутливість до зсуву несучої частоти.

Зсув несучої частоти, кратний відстані між підканалами, робить демодуляцію неможливою, тому що неправильно витягується інформація з підканалу, а зсув, не кратний відстані між підканалами, призводить до втрати ортогональності і виникненню МКІ, що істотно погіршує якість сигналу.

Спотворення викликані ще й тим, що неможливо знизити їх рівень або повністю усунути збільшенням потужності передавача, оскільки джерелом завад є сам сигнал. Тому при проектуванні необхідно враховувати максимально допустиме погіршення ВСШ каналу, викликане помилками синхронізації.

Висновки до другого розділу

1. Канали із завмираннями характеризуються випадковою зміною коефіцієнта передачі, тому параметри сигналів на вході приймача є випадковими і невідомими. Випадкові зміни параметрів каналу зв'язку являють собою мультиплікативну заваду.

2. Найбільш істотний вплив на якість приймання сигналів у системах радіозв'язку здійснюють навмисні завади та швидкі селективні завмирання в каналі, причому ступінь впливу завмирань визначається співвідношенням параметрів середовища поширення і параметрів сигналу.

3. Шкідливий вплив швидких селективних завмирань та завад може бути ослаблено вибором певних сигналів і відповідною структурою побудови апаратури каналу, що входить до складу каналу зв'язку.

3. ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З МОДУЛЯЦІЄЮ OFDM

3.1 Модуляція QAM

Квадратурна амплітудна модуляція є різновидом багатопозиційної амплитудно-фазової модуляції, це метод перетворення потоку цифрових даних на аналоговий сигнал певної форми (рис. 3.1) [11].

Відповідно до принципів цієї модуляції цифровий сигнал кодується у вигляді дискретів у фазовій площині IQ , де I є синфазною складовою, а Q – квадратурною. Результируючий сигнал можна представити як певну зміну двох параметрів сигналу – амплітуди і фази (A_m, I_m):

$$Z_m(t) = I_m \cos(2\pi f_c t) + Q_m \sin(2\pi f_c t),$$

де $I_m = \alpha_m p$, $Q_m = \beta_m p$;

m – порядковий номер дискрета;

$t = [(m-1) \Delta t \dots m \Delta t]$ – час;

Δt – крок квантування вхідного сигналу за часом;

p – інтервал квантування за амплітудою;

α_m, β_m – модуляційні коефіцієнти;

f_c – частота несучої.

Вираз для сигналу на комплексній площині:

$$Z = I + jQ \quad \text{або} \quad Z_m = A_m \exp(2\pi f_c t + \varphi_m),$$

де $A_m = \sqrt{Q_m^2 + I_m^2}$ – амплітуда модульованого сигналу;

$\varphi_m = \arctg(Q_m / I_m)$ – фаза модульованого сигналу.

На рисунку 3.1 наведена структурна схема створення коливання Z шляхом сумування квадратурної складової Q з синфазною складовою I .

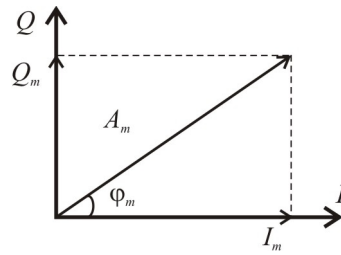


Рисунок 3.1 – Принцип формування результуючого коливання QAM

Структурна схема отримання сигналу QAM представлена на рис. 3.2.

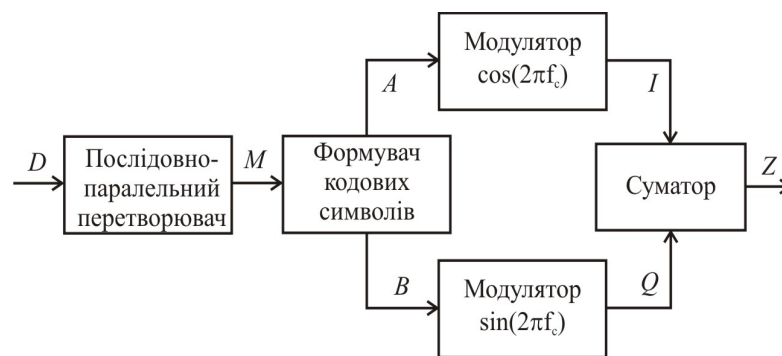


Рисунок 3.2 – Формування сигналу QAM

Вхідний потік цифрових даних перетворюється в послідовність кодових символів. Потім кожен кодовий символ перетворюється в сигнал певного співвідношення I і Q , так що на виході виходить амплітудно-модульований сигнал QAM.

На рисунку 3.3 є сузір'я QAM-16. В такому сигналі наявні 16 станів.

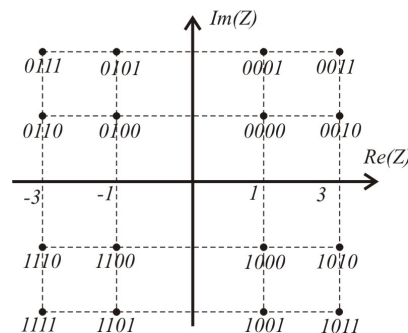


Рисунок 3.3 – Структура сузір'я QAM-16

На рисунку 3.3 показані значення модуляційних символів, яким відповідають точки на фазовій площині модульованого коливання $\{m_3, m_2, m_1, m_0\}$. Для алгоритму QAM-16 пара $\{m_3, m_2\}$ визначає номер квадранта фазової площини або знаки дійсної і уявної координати вектора модульованого коливання.

3.2 Модуляція OFDM

OFDM – мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів є цифровою схемою модуляції, яка має багато близько розташованих ортогональних піднесучих. Кожна піднесуча модулюється за звичайною схемою модуляції (наприклад, квадратурна амплітудна модуляція) на низькій символній швидкості, зберігаючи загальну швидкість передачі даних, як і у звичайних схем модуляції однієї несучої в тій же смузі пропускання. На практиці сигнали OFDM отримують шляхом використання ШПФ (швидке перетворення Фур'є).

Паралельна передача даних з частотним поділом була придумана ще в середині 60-х років минулого століття і використовувалася, як і більшість відомих сьогодні технологій, спочатку тільки у військових системах. В ті часи військові, використовуючи OFDM, вже здійснювали паралельну передачу даних з використанням 34 піднесучих [12].

У 1980-х стали розглядати застосування OFDM в комерційних системах: в першу чергу в високошвидкісних модемах і цифрових мобільних мережах. У 1990-х OFDM модуляцію стали використовувати в цифровому радіомовленні (DAB), в наземному телебаченні, при передачі відео високої чіткості HDTV, а також у відомих технологіях останньої милі ADSL, HDSL.

Довгий час OFDM не знаходила досить широкого поширення в інших системах зв'язку унаслідок складної технічної реалізації. Вирішення завдання

формування OFDM сигналу аналоговими методами досить проблематично. Розвиток обчислювальних систем і методів цифрової обробки сигналів дозволяє застосовувати сьогодні OFDM модуляцію в самих різних системах - від радіо до провідних ліній і навіть волоконно-оптичних.

Незважаючи на те, що метод дослівно розшифровується як мультиплексування з ортогональним частотним поділом, його відносять до методів цифрової модуляції. Метод OFDM використовує одночасно і модуляцію і мультиплексування. Звичайне мультиплексування має на увазі об'єднання різних сигналів від різних джерел, тут відбувається об'єднання складових частин одного і того ж сигналу.

У разі OFDM ми розбиваємо потрібну інформацію, що передається, на певну кількість частин, для прикладу нехай їх буде 4. Далі кожна піднесуча перевозить свою частину інформації, при цьому піднесучи ідуть одночасно паралельно одна одній. Припустимо на шляху у нас зустрічаються вузькосмугові завади. Одна з піднесучих спотворюється, відповідно одна з частин інформації не доходить до пункту приймання.

Однією з особливостей OFDM є те, що всі піднесучи ідуть паралельно і не заважають одна одній. При передачі сигналів використовується властивість ортогональних сигналів. Ортогональні сигнали мають властивість – їх взаємна енергія дорівнює нулю. Ортогональність піднесучих дозволяє на прийомі виділити кожен з них із загального сигналу навіть в разі часткового перекриття їх спектрів. Оскільки піднесучи розташовуються впритул одна до одній і навіть частково накладаються спектральна ефективність модульованого OFDM сигналу виходить висока.

Кожна піднесуча представлена окремим піком. В точці піку кожної піднесучої значення інших піднесучих дорівнює нулю. На осі часу кожній кривій відповідає свій модульований сигнал. Сума всіх цих сигналів дає складний за формою OFDM-сигнал.

Параметри піднесучих сигналів (наприклад, синусоїд) підбираються таким чином, щоб вони були ортогональними по відношенню один до одного.

Для швидкої реалізації даної дії за допомогою обчислювальних пристроїв використовують алгоритм оберненого швидкого перетворення Фур'є (ОШПФ). Тобто ми навмисно представляємо, що значення сигналу перед блоком ОШПФ відносяться до частотної області. Тоді на виході блоку ОШПФ ми отримуємо значення сигналу на часовій осі. Об'єднуючи всі значення, ми отримуємо складний OFDM сигнал.

Важливо відзначити, що в даній спрощеній схемі представлені не всі блоки, наявні в реальних системах з OFDM. Тут для спрощення схеми не наведено блоки додавання захисних біт і циклічного префікса, що є невід'ємною частиною технології.

З причини того, що ОШПФ працює ефективно з масивами розмірності 2^k , піднесучі вибираються аналогічної кратності. Наприклад, в WiMAX число піднесучих вибирається від 128 до 2048 і займає частоти від 1,25 МГц до 20 МГц. Для кожної з піднесучих використовується свій формат модуляція в залежності від вимог і величини завад в каналі.

На приймальному боці всі блоки наведеної вище схеми інвертуються (замість ЦАП ставиться АЦП, замість зворотного ШПФ - пряме ШПФ) і ставляться в зворотному порядку.

Модуляція OFDM має наступні переваги:

- здатність протистояти складним умовам в радіоканалі, усувати міжсимвольну інтерференцію і боротися з вузькосмуговими завадами;
- висока спектральна ефективність. Якщо число піднесучих наближається до нескінченності, OFDM системи показують майже подвоєну спектральну ефективність в порівнянні з традиційними системами з частотним поділом каналів.
- адаптивність методу - можливість використання різних схем модуляції для різних піднесучих, що дозволяє адаптуватися до умов поширення сигналу і до різних вимог до якості сигналу;
- проста реалізація методами цифрової обробки (спростилась з розвитком потужності обчислювальних пристроїв);

- здатність протистояти інтерференції між піднесучими, що зумовлює добрі показники при багатопроменевому поширенні.

Модуляція OFDM має наступні недоліки:

- потрібно високоточна синхронізація за часом і за частотою;
- OFDM сигнал має відносно високе значення пік-фактора, що призводить до надмірних енергетичних витрат;
- використання захисних інтервалів знижує спектральну ефективність;
- метод чутливий до ефекту Доплера, що накладає додаткові труднощі при його застосуванні в мобільних мережах.

Поточне застосування OFDM. На сьогоднішній день найбільш відоме застосування OFDM модуляції в бездротових системах зв'язку Wi-Fi, WiMax, LTE, в наземних системах цифрового телебачення DVB-T, в системах кабельного телебачення DVB-C, в технології ADSL, тощо.

Ускладнюють реалізацію OFDM такі питання, як додавання циклічного префікса для усунення завад і боротьби з завмираннями, процедури тактовою та фазової синхронізації, використання пілотних піднесучих і ін.

OFDM, як метод модуляції з декількома несучими, широко застосовується в системах зв'язку 4G, таких як LTE і Wi-Fi. Він має багато переваг: стійкість до затримок в каналах, одноотводне вирівнювання в частотній області та ефективна реалізація. Часто не звертають уваги на його недоліки, такі як втрата спектральної ефективності через більш високі бічні пелюстки і строгі вимоги до синхронізації. Таким чином, для систем зв'язку 5G розглядаються нові методи модуляції, що дозволяють подолати деякі з цих факторів.

Як приклад, система LTE з пропускною здатністю каналу 20 МГц використовує 100 блоків ресурсів по 12 піднесучих в кожному з рознесенням окремих піднесучих на 15 кГц. При цьому використовується тільки 18 МГц виділеного спектра, що призводить до 10-процентних втрат. Крім того, циклічний префікс з 144 або 160 вибірок на символ OFDM призводить до ще

приблизно 7% втрат ефективності, а загальна втрата можливої спектральної ефективності становити 17%.

З урахуванням вимог ІТУ до систем 5G додатків потрібні більш високі швидкості передачі даних, менша затримка і більш ефективне використання спектра.

3.3 Демодулятор сигналів з OFDM модуляцією

Демодулятор OFDM демультимплексує сигнал у часовій області з декількома піднесучими, використовуючи модуляцію з ортогональним частотним поділом [13].

Демодуляція OFDM використовує операцію швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), яка призводить до N паралельним потокам даних. Демодулятор OFDM складається з банку з N кореляторів, з кожним корелятором, призначеним для певної піднесучої OFDM, з подальшим перетворенням з паралельного коду в послідовний (рис. 3.4).

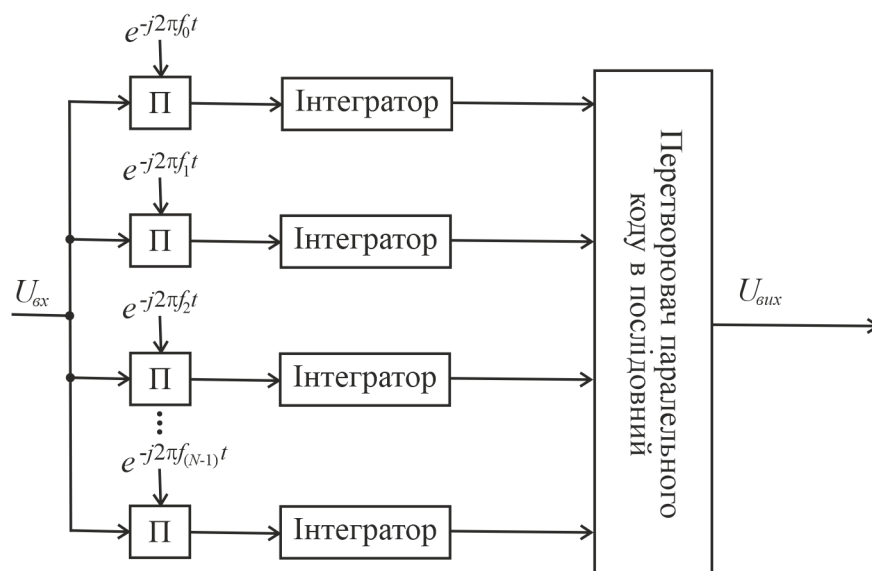


Рисунок 3.4 – Демодулятор OFDM сигналу

Індивідуальні піднесучі OFDM виділяються як піднесучі даних, пілот-сигналу або нульові піднесучі. Піднесучі передають призначені для користувача дані. Піднесучі пілот-сигналу використовуються для оцінки каналу. Нульові піднесучі залишають поза передачею даних. Піднесучі без даних використовуються для надання нульового значення DC та служать в якості буферів між блоками ресурсів OFDM.

Нульова піднесуча DC є центром смуги частот із значенням індексу $(nfft/2 + 1)$, якщо $nfft$ парне, або $((nfft + 1)/2)$, якщо $nfft$ непарне.

Захисні смуги забезпечують буфери між послідовними символами OFDM для захисту цілісності переданих сигналів за рахунок зменшення міжсимвольних завад.

Нульові піднесучі дозволяють моделювати захисні смуги і розташування піднесучих постійного струму для конкретних стандартів, таких як різні формати 802.11, LTE, WiMAX або для призначених для користувача розподілів. Ви можете виділити розташування нульових значень, призначивши вектор нульових індексів піднесучій.

3.4 Цифрова система зв'язку з OFDM модуляцією

На рис. 3.5 показано, як N рівновіддалених піднесучих можна об'єднати для формування масиву паралельних сигналів. Кожна з піднесучих модулюється з використанням QAM. Ці модульовані піднесучі можуть використовуватися для підтримки незалежних сигналів основної смуги частот, але частіше їх комбінують, щоб забезпечити максимальну пропускну здатність для одного потоку даних.

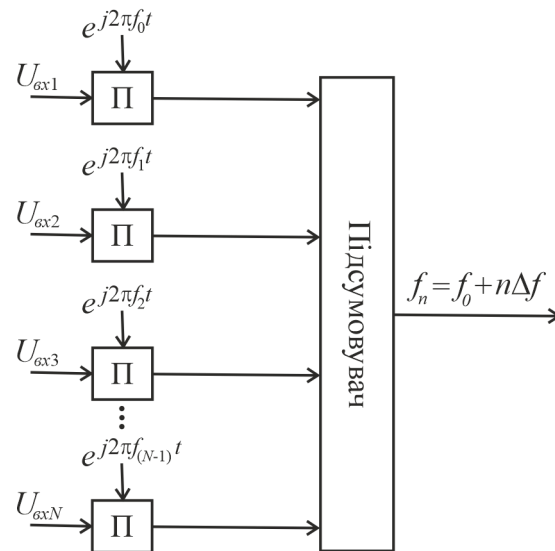


Рисунок 3.5 – Модулятор OFDM підсумовує сигнали різних частот.

Ми можемо представити ці піднесучі математично, використовуючи комплексну форму, що узгоджується з використанням QAM.

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{j2\pi f_n t},$$

де $f_n = f_0 + n \Delta f$.

Наведені вище рівняння є безперервними функціями. Сучасні системи OFDM цифрові, в них використовується цифрова обробка сигналів.

Сучасні системи OFDM використовують піднесучі, які існують в дискретній (дискретизованій) формі з частотою дискретизації [14]:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t}$$

З N піднесучими, розділеними частотним проміжком

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t}$$

Для простоти на рисунку 3.6 показані чотири немодульовані піднесучі, що відповідає частотам f_0, f_1, f_2, f_3 . в області часу.

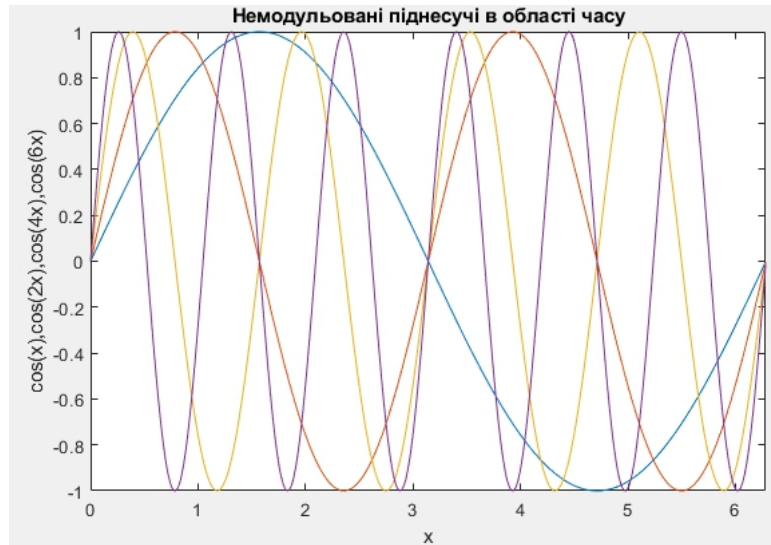


Рисунок 3.6 – Сигнал OFDM, що містить чотири несучих

Найменша частотна складова – несуча (f_0), а інші складові - це піднесучі з більш високими частотами, що рознесені з інтервалом, кратним Δf .

На рис. 3.7 показані ці ж піднесучі в частотній області, показані з деякою шириною смуги модуляції, щоб вказати перекриття між піднесучими. Піднесучі ортогональні одна одній і будуть мати мінімальні завади для інших піднесучих, що призведе до ефективного використання смуги пропускання. Зверніть увагу, що амплітуда кожної піднесучої перетинає нуль в центрі інших піднесучих, мінімізуючи вплив сусідніх піднесучих. Чотири піднесучих OFDM в частотній області показані на рис. 3.7.

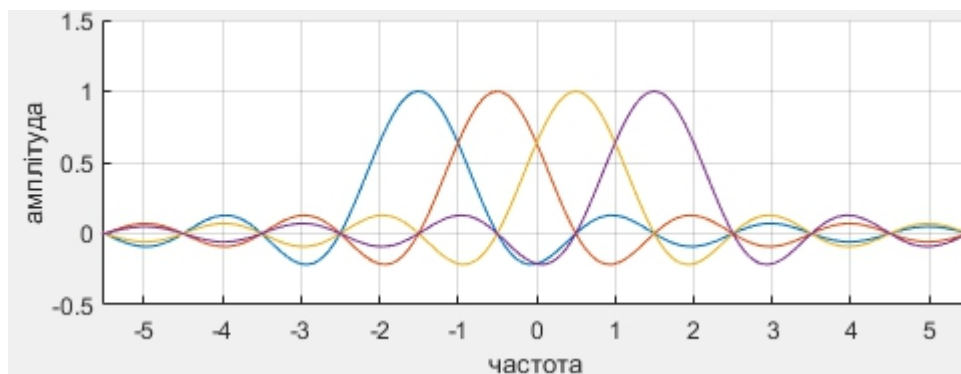


Рисунок 3.7 – Несучі OFDM сигналу в області частоти

На рис. 3.8 показана базова блок-схема повної наскрізної системи OFDM, що складається з передавача і приймача. Бітовий потік надходить в систему зліва на схемі. Як правило, цей єдиний потік бітів демультимплексується на менші бітові потоки, які подаються на окремі модулятори QAM для кожної з N піднесучих.

Ключовим фактором для OFDM є використання оберненого швидкого перетворення Фур'є (ОШПФ) для ефективного створення форми сигналу в області часу. Результуючий сигнал OFDM в цифровій формі управляє цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП), який перетворює його в аналоговий сигнал [15].

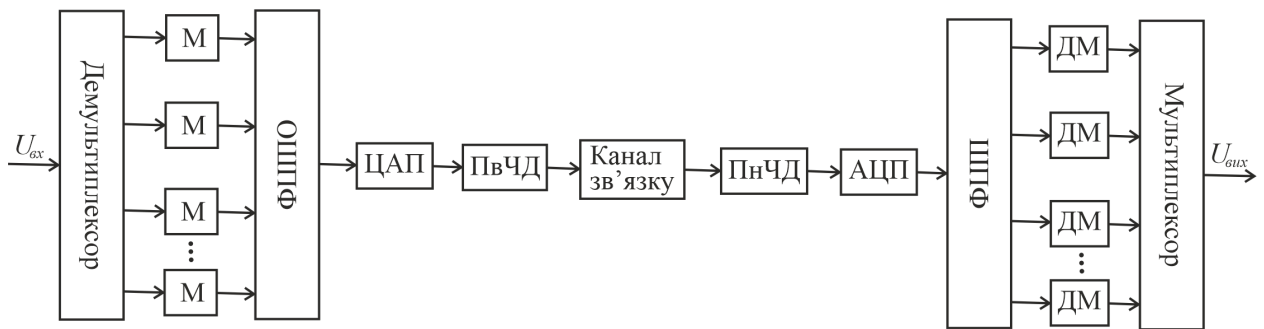


Рисунок 3.8 – Цифрова система зв'язку з OFDM (М – QAM модулятор; ОШПФ – обернене швидке перетворення Фур'є; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ПвЧД – підвищуючий перетворювач частоти дискретизації; ПнЧД – понижуючий перетворювач частоти дискретизації; АЦП – аналого-цифровий перетворювач ШПФ – швидке перетворення Фур'є; ДМ – QAM демодулятор)

Цей сигнал основної смуги частот зазвичай перетворюється з підвищенням частоти (UP) до більш високої частоти (і, можливо, післюється) перед передачею по ефірному каналу.

У приймачі процес зворотний. Аналоговий перетворювач з пониженням частоти (DOWN) переводить сигнал OFDM назад в смугу

модулюючих частот. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює сигнал в цифрову форму і передає його в блок ШПФ. Блок ШПФ перетворює сигнал з області часу в масив піднесучих, що мають модуляцію QAM. Демодулятори QAM відтворюють потік бітів від кожної піднесучої, який потім мультиплексується (MUX) для відтворення початкового одиночного потоку даних.

Основні ідеї тут: 1) об'єднання множини піднесучих QAM для створення широкопasmової системи і 2) використання ШПФ і ОШПФ для ефективного перетворення цих піднесучих в єдиний бездротовий сигнал. Можна використовувати діапазон модуляції QAM, починаючи з BPSK (один біт на символ) до 256QAM (8 біт на символ). Поєднання цього з використанням множини піднесучих (можливо, 4096) приводить до дуже високих швидкостей передачі даних.

Захисний інтервал потрібний, щоб забезпечити деякий часовий поділ між символами. Це простий метод запобігання багатопроменевому поширенню в каналі, що викликає інтерференцію між символами. Кращий метод вставляє циклічний префікс (CP) в захисний інтервал, що призводить до форми OFDM, званої CP-OFDM. CP створюється шляхом копіювання останньої частини запису IFFT і додавання її в початок запису, діючи як захисний інтервал.

3.5 Використання сигналів OFDM в бездротовому зв'язку

OFDM, мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів, є широко використовуваним методом цифрової модуляції в бездротовому зв'язку, такий як WLAN, LTE, DVB-T і 5G.

OFDM відноситься до класу схем модуляції з декількома несучими. OFDM розбиває смугу частот передачі на групу вузьких суміжних піддіапазонів (несучих), і кожна несуча модулюється індивідуально. Ви можете реалізувати цей тип модуляції за допомогою зворотного швидкого

перетворення Фур'є (IFFT). За рахунок використання вузьких ортогональних піднесучих сигнал OFDM набуває стійкість в порівнянні з частотно-вибірковим каналом із завмираннями і усуває перехресні завади від сусідніх піднесучих. На приймальному боці ви можете демодулювати сигнал OFDM за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) і вирівняти його з комплексним підсиленням на кожній піднесучій. Комбінування OFDM з MIMO може поліпшити швидкість передачі даних. Оскільки декілька потоків даних можуть передаватися одночасно з декількома несучими, на OFDM не впливає шум в тій мірі, що і на модуляцію з однією несучою. Це пов'язано з тим, що час для символу можна збільшити пропорційно кількості носіїв.

Сигнал OFDM об'єднує інформацію у вигляді ортогональних сигналів з однією несучою в частотній області в форму сигналу у часовій області, яка може передаватися по повітрю. Піднесучі використовують QPSK або QAM в якості основного методу модуляції.

Рівняння зворотного дискретного перетворення Фур'є має вигляд:

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} F(t) e^{j \frac{2\pi x t}{N}}$$

У OFDM, коли амплітуда кожної під несучої (рис. 3.9) досягає

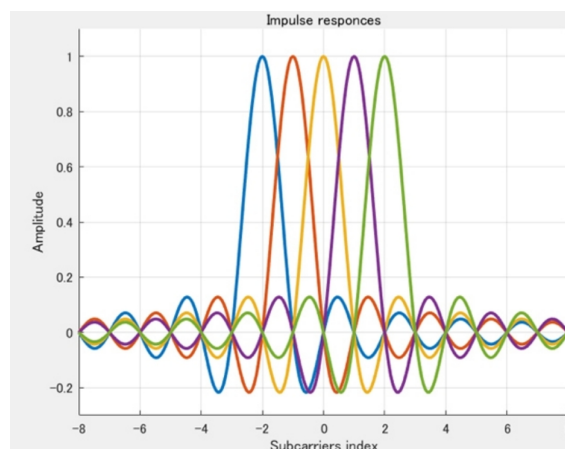


Рисунок 3.9 – Подання в частотній області ортогональних піднесучих

максимуму, несучі розташовуються з інтервалами $1/\text{час}$ символу, амплітуда інших піднесучих дорівнює 0, тим самим запобігаються взаємні завади між символами. Більш того, OFDM передачі з множиною несучих ефективний в середовищах з багатопроблемним поширенням, оскільки вплив багатопроблемного поширення сконцентровано на конкретних піднесучих в порівнянні з передачею з однією несучою. У разі передачі з однією несучою багатопроблемність впливає на якість сигналу [14].

Різниця в часі приходу між прямою і відбитою хвилями збільшується, коли сигнал передається на великі відстані. У цій ситуації кількість піднесучих більше, ніж в меншому діапазоні послуг.

При специфікації стандарту 5G були розглянуті різні технології, засновані на OFDM. CP-OFDM (циклічний префікс OFDM) використовується в LTE і також був обраний для стандарту 3GPP Release 15. Цей метод додає сигнал верхнього рівня, званий циклічним префіксом, в початок символу OFDM. CP-OFDM пригнічує міжсимвольні завади (ISI) і завади між несучими (ICI), вставляючи дані протягом певного періоду часу з заднього кінця символу OFDM як циклічного префікса на початку символу OFDM.

Модуляція OFDM має наступні переваги. Піднесучим OFDM може бути призначено декілька користувачів. Частоту можна ефективно використовувати ортогонально. OFDM стійкий до спотворення передачі через багатопроблемне поширення, що уможлиблює демодуляцію шляхом виправлення помилок без використання складного еквалайзера.

Модуляція OFDM має наступні недоліки. Оскільки амплітуда сигналу значно змінюється, необхідно розробити підсилювач з більш високим відношенням пікової та середньої потужності, меншою, ніж середня потужність передачі, що допускається підсилювачем, або підсилювач з широким динамічним діапазоном. Зокрема, коли інтервал несучої є вузьким, вплив OFDM стає слабкішим у порівнянні з доплерівським зсувом, тому бажано використовувати підсилювач з широким динамічним діапазоном.

Висновки до третього розділу

1. Ускладнюють реалізацію модуляції OFDM такі питання, як додавання циклічного префікса для усунення завад і боротьби з завмираннями, процедури тактової та фазової синхронізації, використання пілотних під несучих, тощо.

2. Кожна під несуча OFDM модулюється за звичайною схемою модуляції (наприклад, QAM) на низькій символній швидкості, зберігаючи загальну швидкість передачі даних, як і у звичайних схем модуляції однієї несучої в тій же смузі пропускання. На практиці сигнали OFDM виходять шляхом використання ШПФ (швидке перетворення Фур'є).

3. Ортогональність піднесучих дозволяє на приймальному боці виділити кожну піднесучу з сумарного сигналу навіть у разі часткового перекриття їх спектрів. Умова ортогональності піднесучих: $\Delta f = f_i - f_{i-1} = 1/T_i$.

4. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З ОРТОГОНАЛЬНИМ ЧАСТОТНИМ ПОДІЛОМ КАНАЛІВ

4.1 Використання модуляції OFDM

OFDM це цифрова модуляція, яка заснована на використанні великої кількості розташованих на невеликих відстанях під несучих, що ортогональні [1]. Кожна піднесуча може бути промодульована за широко вживаною схемою модуляції з використанням низької символної швидкості, На практиці сигнали OFDM отримують за зворотним ШПФ. На рис. 4.1 наведені розташування спектрів під несучих сигналу OFDM [15].

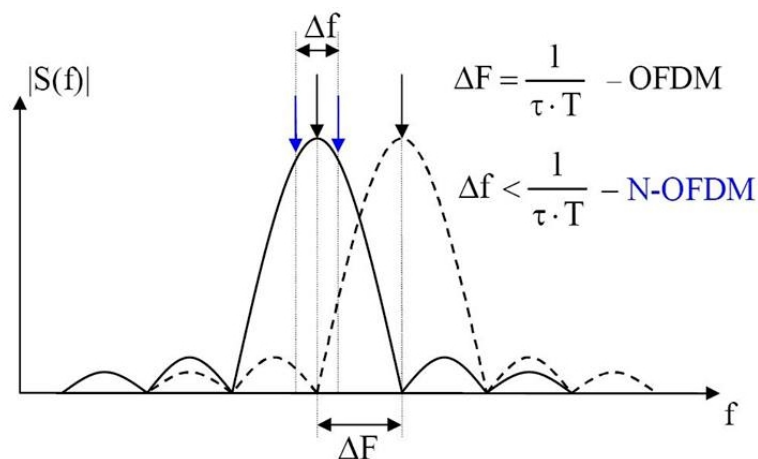


Рисунок 4.1 – Розподіл сигналів піднесучих в області частоти

OFDM сигнал формується за допомогою N піднесучих, які рознесені по частоті на інтервали Δf .

При такому розміщенні частот займана OFDM сигналом повна смуга частот Δf ділиться на N підканалів, ширина яких $\Delta f = 1/T_s$, де T_s - тривалість сигнальної вибірки, над якою виконується операція швидкого перетворення Фур'є (символьний інтервал). Таким чином, частотний інтервал між піднесучими $\Delta f = \alpha / T_s$, для $\alpha = 1$ відповідає OFDM.

Загальна смуга частот, яку займають N ортогональних частотних підканалів OFDM, описується виразом: $\Delta F = N / T_s$.

Основною перевагою OFDM – здатність протистояти складним умовам в каналі. Наприклад, боротися з загасаннями в області високих частот, вузькосмуговими завадами і частотно-вибірковими завмираннями, викликаними багатопроменевим характером поширенням. Низька символна швидкість робить можливим використання захисного інтервалу між символами, що дозволяє справлятися з розсіюванням в області часу і усувати міжсимвольну інтерференцію (МСІ).

Принципова відмінність OFDM від звичайної багатоканальної передачі з частотним поділом каналів полягає в тому, що спектри сигналів, відповідних окремим вузькосмуговим каналам, не розділені захисними частотними інтервалами; навпаки, вони навмисно робляться смуги з перекриванням спектрів (відстань між сусідніми піднесущими Δf дорівнює величині, зворотній по відношенню до тривалості символу T : $\Delta f = 1 / T$). Однак частотне відстань між сусідніми піднесущими вибирається таким чином, що сигнали різних каналів виявляються ортогональними і, отже, не створюють взаємних завад при прийманні.

Для модуляції піднесучих в загальному випадку використовується фазова або квадратурна маніпуляція. При цьому число біт, переданих в одному часовому такті, може бути однаковим або різним для різних піднесучих. У радіолініях, як правило, використовуються однакові параметри модуляції для всіх піднесучих, а в провідних каналах зв'язку, де характеристики каналу істотно залежать від частоти і майже не змінюються в часі, активно використовується адаптивний розподіл інформаційного навантаження за піднесучими (системи ADSL, VDSL).

При використанні однакової модуляції на всіх піднесучих завадостійкість в АБГШ-каналі визначається видом модуляції і не залежить від числа піднесучих. Деякі втрати викликаються лише додаванням циклічного префікса і пілот-сигналів.

Зазначена відстань між піднесучими дає можливість обчислювати ефективну реалізацію формувача сигналу на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Для пояснення цієї ідеї розглянемо структуру OFDM-сигналу докладніше. Комплексну огинаючу OFDM-сигналу можна представити у вигляді суми сигналів декількох ортогональних піднесучих (ортогональних на довжині символу

Структурна схема передавача OFDM приведена на рис. 4.2 [16].

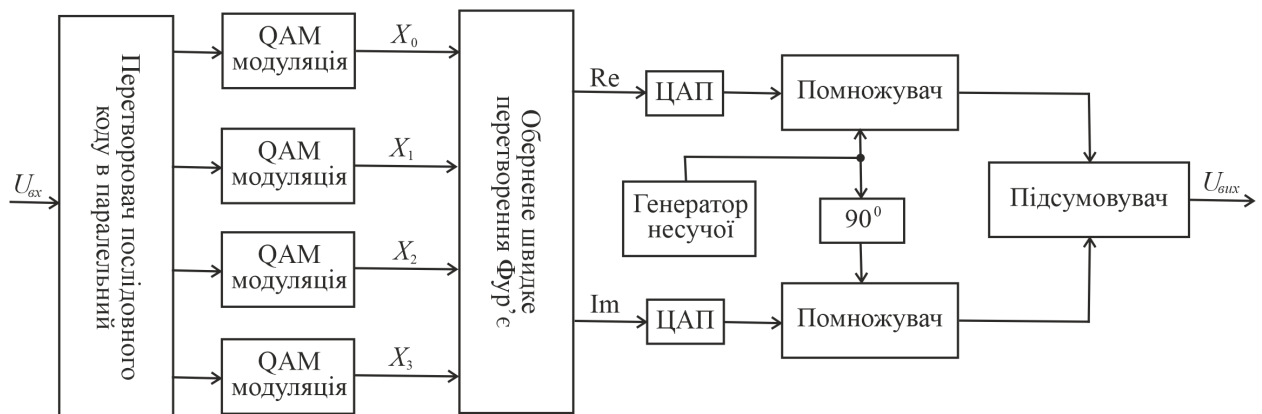


Рисунок 4.2 – Передавач OFDM

Сигнал OFDM - сума декількох ортогональних піднесучих, на кожній з яких дані, що передаються на основній частоті, незалежно модулюються за допомогою одного з типів модуляції (BPSK, QPSK, 8-PSK, QAM тощо). Далі цим сумарним сигналом модулюється радіочастота.

На вході діє послідовний потік двійкових цифр. Перед зворотним швидким перетворенням Фур'є цей потік перетворюється спочатку в N паралельних потоків, після чого кожен з них відображається в потік символів за допомогою процедури фазової або амплітудно-фазової квадратурної модуляції. При використанні модуляції BPSK виходить потік двійкових чисел, при QPSK, 8-PSK, QAM - потік комплексних чисел. Оскільки потоки незалежні, то спосіб модуляції i , отже, кількість біт на символ в кожному потоці можуть бути різними. Отже, різні потоки можуть мати різну бітову

швидкість. Наприклад, пропускна здатність лінії 2400 бод (символів в секунду), і перший потік працює з QPSK (2 біта на символ) і передає 4800 біт/с, а інший працює з QAM-16 (4 біта на символ) і передає 9600 біт/с [17].

Зворотне ШПФ здійснюється для N символів, що одночасно надходять, створюючи таку ж множину комплексних відліків в часовій області. Далі цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) перетворюють в аналоговий вигляд окремо дійсну і уявну компоненти, після чого вони модулюють, відповідно, радіочастотну косинусоїду і синусоїду. Вони сумуються і дають сигнал $s(t)$, що передається. Структурна схема приймача OFDM приведена на рис. 4.3 .

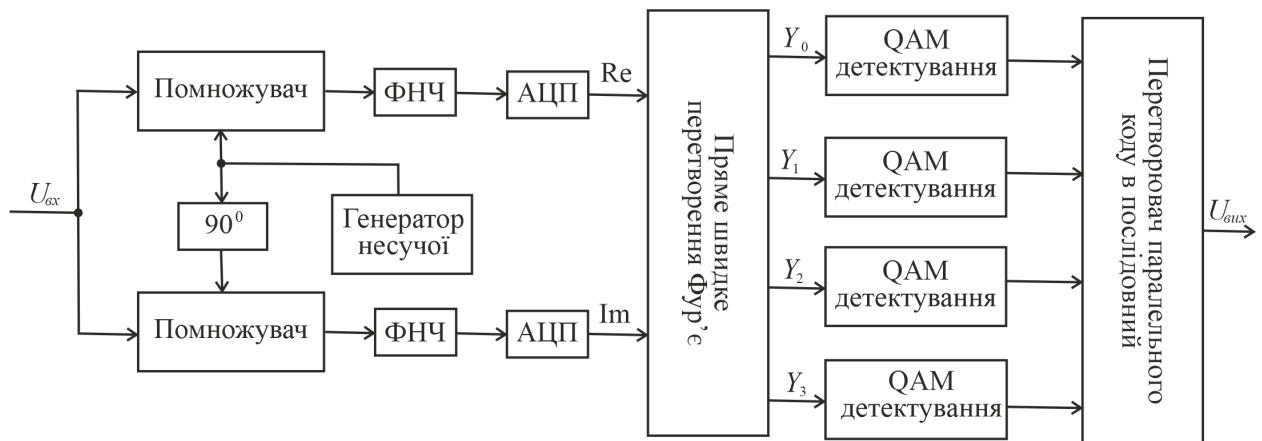


Рисунок 4.3 – Приймач OFDM

Приймач приймає сигнал $r(t)$, виділяє з нього косинусну (\cos) і синусну (\sin) квадратурні складові за допомогою множення $r(t)$ на $\cos(2\pi f_c t)$ і $-\sin(2\pi f_c t)$ і фільтрів нижніх частот, які фільтрують коливання в смузі навколо частоти $2f_c$. Утворені сигнали далі оцифровуються за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), піддаються прямому швидкому перетворенню Фур'є (ШПФ). Виходить сигнал в частотній області.

Далі є N паралельних потоків, кожен з яких перетворюється в двійкову послідовність за допомогою заданого алгоритму фазової модуляції (при використанні в передавачі BPSK, QPSK, 8-PSK) або амплітудно-фазової

квадратурної модуляції (при використанні в передавачі QAM). В ідеалі виходить потік бітів, рівний потоку, який передає передавач.

4.2 Дослідження принципів формування сигналів з OFDM

Складний сигнал на вході приймача можна розкласти на елементарні коливання. Під елементарними коливаннями розуміються сигнали, математично описувані функціями синус або косинус. Якщо підсумувати всі елементарні сигнали, то можна побачити початковий «складний» сигнал.

Функції типу синуса називають гармонійними. Тому їх називають гармоніками. У кожного сигналу є свій унікальний набір гармонік. Цей набір гармонік називають спектром сигналу.

Кожна гармоніка являє собою найпростіше коливання, що описується математичною функцією синус. Коефіцієнт перед синусом називається «амплітудою», а аргумент - «фазою». Фаза є сума двох чисел. Перший доданок - добуток часу на кутову частоту, а другий доданок - початкова фаза. Гармоніки розглянутого складного сигналу мають нульову початкову фазу, це було підібрано для наочності. Щоб не сплутати звичайну фазу з початковою, її називають «повною фазою». Зазначу лише, що коли зустрічається слово «фаза» в літературі, то під цим розуміють деякий стан. У нашому випадку, повна фаза сигналу-гармоніки описує деякий стан функції в даний момент часу. Знаючи закон зміни гармоніки (синус) і її поточний стан (повну фазу) можна довідатися яке зараз значення у гармоніки [17].

Вести записи з синусами буває не завжди зручно. В інженерній практиці зазвичай переходять до форми запису у вигляді експонент. В цьому є деякі плюси. Треба відзначити, що під час запису у вигляді експоненти використовуються комплексні числа. Теорія цих чисел нерозривно пов'язана з поняттям уявної одиниці. Наочно експоненційну форму можна зобразити у вигляді обертового вектора, як показано на малюнку вище. Обертається він з циклічною частотою в площині, де по одній осі відкладені дійсні числа, а за

іншою уявні. У математиці існує дуже важливе перетворення, яке пов'язує сигнал і його спектр. Воно називається перетворенням Фур'є.

Існує два види перетворень Фур'є. Пряме перетворення конвертує сигнал в спектр, а зворотне - спектр в сигнал. У формули потрібно підставляти функції, що описують або спектр або сигнал, в залежності від типу конвертації.

Після прямого перетворення сигналу, зображеного на картинці у вигляді затухаючої експоненти, отримаємо його спектр. У загальному випадку будь-який спектр - це комплексне число. Вище згадувалося про числах і про форму запису сигналів у вигляді експонент. У такій формі фігурують два параметра сигналу: амплітуда і початкова фаза. Якщо сигнал складний, то він складається з декількох гармонік, кожна гармоніка має свою амплітуда і свою фазу. Врахувати математично це просто. У експоненційного запису сигналу замість звичайних чисел амплітуди і початкової фази записують функції амплітуди від частоти і початкової фази від частоти. Такі залежності дає пряме перетворення Фур'є на виході. В результаті виділяють амплітудний спектр і фазовий спектр сигналу. На зображенні вище зображені ці спектри. Вони складаються з великої кількості гармонік, тому малювати їх не наочно. Зазвичай зображують тільки огинаючі.

Складні сигнали розкласти можна не тільки на синуси або косинуси або експоненти. Існують і інші класи «елементарних» функцій, у вигляді суми яких можна представити сигнал. Всі ці функції всередині класу мають загальну властивість - ортогональність. Або іншими словами - перпендикулярність. Таким чином, якщо взяти дві ортогональні функції і уявити, що вони не функції, а вектори, то між ними буде кут в 90 градусів. Якщо перемножити ці дві функції, то вийде нуль. Це не просто нуль, за цим нулем є певний сенс: взаємна енергія між ортогональними сигналами дорівнює нулю, тобто вони не взаємодіють один з одним.

У техніці є достатня кількість методик, які здійснюють аналогове перетворення Фур'є. Однак в цифровій техніці, де застосовуються дискретні

сигнали, використання аналогових перетворювачів часто не доречно. В результаті, величезну популярність отримав математичний алгоритм, який дозволяє швидко отримати спектр сигналу. Алгоритм отримав назву «швидке перетворення Фур'є» (Fast Fourier Transform, FFT), його спрощена схема показана на малюнку нижче.

Швидке перетворення Фур'є працює з дискретними сигналами. Дискретний сигнал - це набір чисел, взятих через певний проміжок часу з значень аналогового сигналу.

Дискретизація сигналу виконується за певними правилами за теоремою Котельникова (Шеннона). Якщо кожне число з набору дискретного сигналу представити у вигляді бінарного коду, то вийде цифровий сигнал. В кінцевому рахунку, з аналогового сигналу тривалістю T виходить масив з N чисел (точок) [18].

Завдання дискретного перетворення Фур'є полягає в тому, щоб отримати з масиву відліків сигналу масив чисел спектра. Ці числа є коефіцієнтами при ортогональних функціях розкладання, про які говорилося вище. Дискретна форма прямого перетворення Фур'є має вигляд:

$$C_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j \frac{2\pi nk}{N}}$$

Дискретна форма оберненого перетворення Фур'є має вигляд:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} C_n e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}$$

З цього моменту починається безпосередньо алгоритм швидкого перетворення Фур'є. Алгоритм кращим чином працює для масивів, розмір яких кратний степені двійки. Тому, якщо кількість відліків відмінне від степені числа два, то їх збільшують, округляючи в більшу сторону, з

заповненням відсутніх елементів нульовими значеннями. Всю послідовність розбивають на дві частини: парні і непарні відліки. Довжини отриманих послідовностей складають $N/2$.

Повна формула для будь-якого коефіцієнта C має вигляд:

$$C_n = \begin{cases} C_n + C_n e^{\frac{-j2\pi n}{N}}, & n \quad N/2 - 1 \\ C_{n-N/2} - C_{n-N/2} e^{\frac{-j2\pi n}{N}}, & n \quad N/2 \end{cases}$$

В даному вигляді алгоритм дає певний виграш в швидкості. Якщо з дискретного сигналу отримувати спектр «в лоб» (формула під номером 3 на малюнку), то на це буде потрібно N операцій множення на комплексне число та N складань. І це тільки, щоб отримати один спектральний коефіцієнт, а їх всього N . Зрештою, щоб отримати всі коефіцієнти треба виконати N^2 множень і N^2 складань. Якщо використовувати вираз, отримане вище (формула під номером 6 на малюнку), то буде потрібно $2(N/2)^2 + N$ множень. Це майже в два рази менше. Розбиттям кожної послідовності, до двоелементний масивів, можна ще більше зменшити кількість обчислень. Така методика призводить приблизно до $M \log_2 N$ операціями множення. Наприклад, для 1024 відліків кількість операцій множення зменшується в 100 разів! Це значно спрощує застосування перетворення Фур'є в техніці.

Вираз для одного символу OFDM, починаючи з $t = t_s$, має вигляд:

$$s(t) = \operatorname{Re} \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j2\pi f_c + \frac{(N-i-2k)}{2T}(t-t_s)}, \quad t \quad [t_s, t_s + T],$$

де d_k - комплексні символи модуляції, N - кількість піднесучих, T - тривалість символу, а f_c - частота несучої.

Після генерації піднесучих дійсна і уявна складові сигналу ОШПФ (оберненого швидкого перетворювача Фур'є) мають вигляд (рис. 4.4).

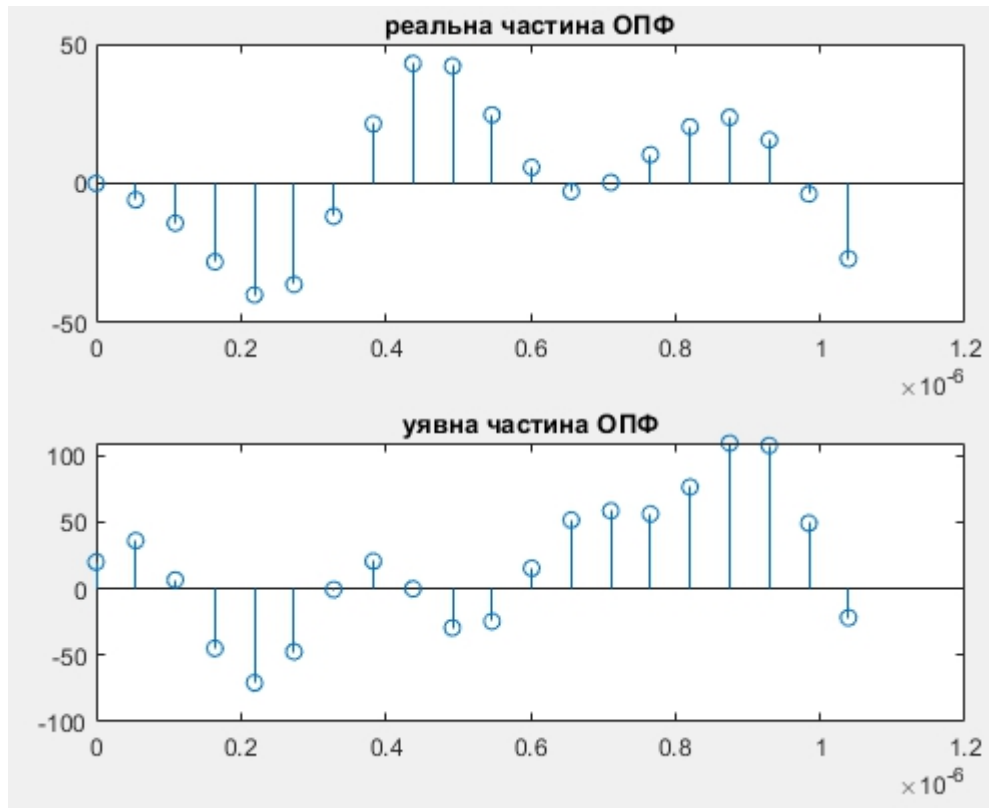


Рисунок 4.4 – Дійсна і уявна частини оберненого перетворення Фур'є

Пряме перетворення Фур'є сигналу OFDM приведено на рис. 4.5.

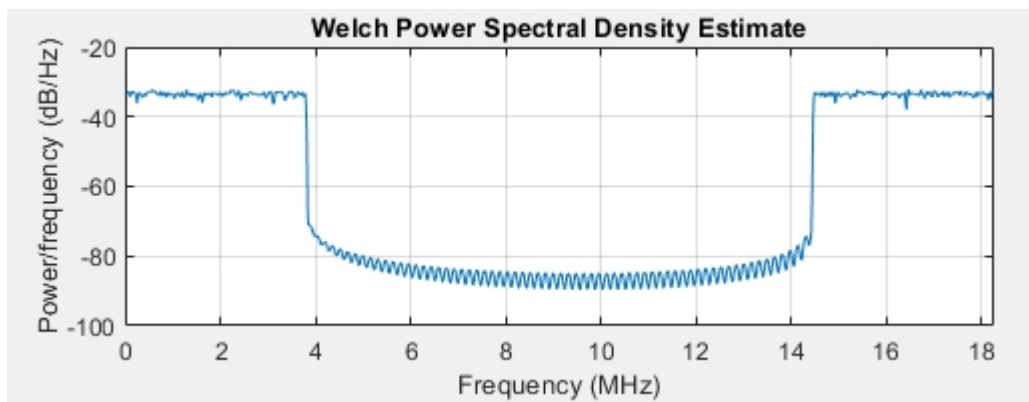


Рисунок 4.5 – Періодограма сигналу OFDM

АЧХ фільтра Баттерворта приведена на рис. 4.6.

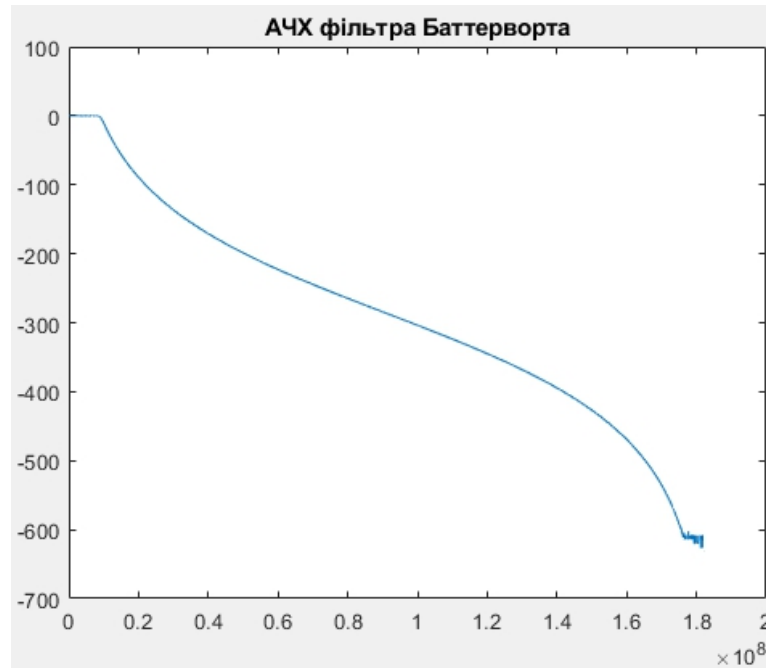


Рисунок 4.6 – АЧХ фільтра Баттерворта

Дійсна і уявна частини відфільтрованого сигналу приведена на рис. 4.7.

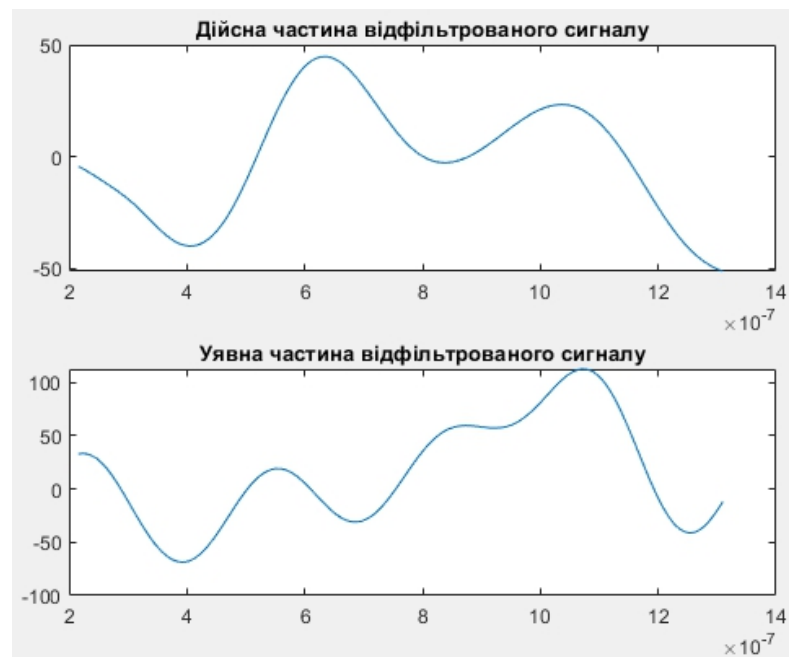


Рисунок 4.7 – Дійсна і уявна частини відфільтрованого сигналу

Практична реалізація OFDM стала реальністю в 1990-х роках завдяки доступності DSP, які зробили швидке перетворення Фур'є доступним [3]:

Числові значення параметрів OFDM для моделювання наступні.

Елементарний період $T = 224 \cdot 10^{-6} / 2048$;

Кількість носіїв $K = 1705$;

Значення номера оператора $K_{\min} = 0$;

Максимальна кількість піднесучих $K_{\max} = 1705$;

Тривалість OFDM символу $T_u = 224$ мкс;

Відстань між несучими $1/T_u = 4464$ Гц

Відстань між несучими K_{\min} і K_{\max} 7,61 МГц

Допустимий захисний інтервал $G = 1/4$.

Дійсна частина сигналу з підвищеною частотою дискретизації приведена на рис. 4.8.

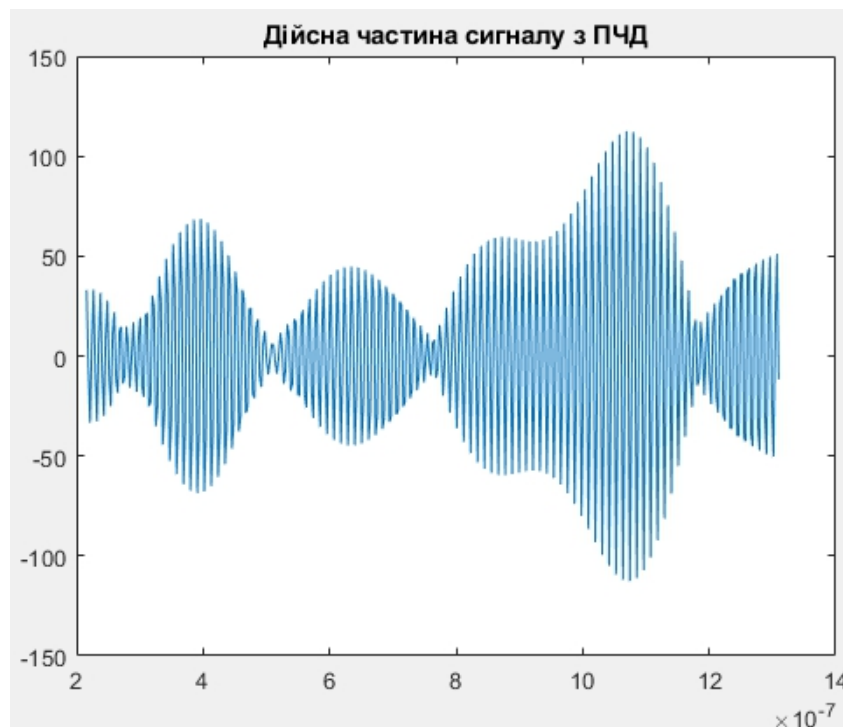


Рисунок 4.8 – Часова діаграма сигналу на виході передавача

Періодограма сигналу з підвищеною частотою дискретизації на виході передавача приведена на рис. 4.9.

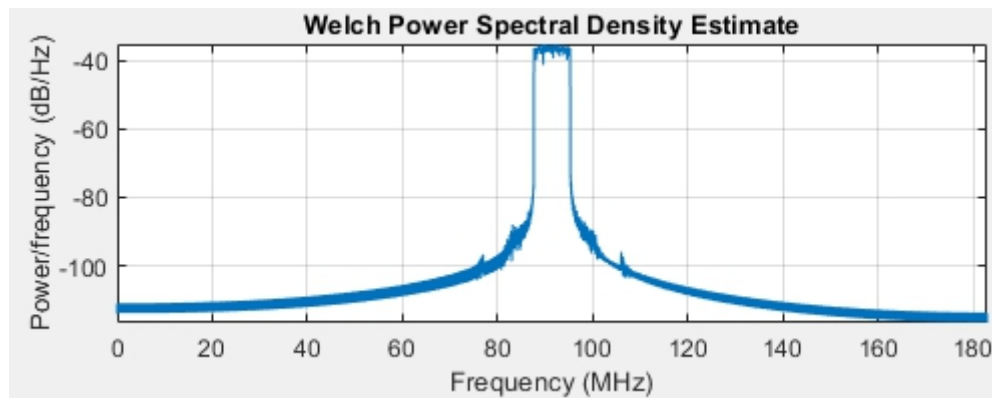


Рисунок 4.9 – Частотна характеристика сигналу на виході передавача

Якщо ставиться завдання передати інформацію, наприклад, від мікрофона в гарнітурі до телефону «по повітря», то для її вирішення необхідно спочатку перетворити голос (звук) і потім будь-яким способом передати його в телефон. Зараз подібного роду завдання вже мають багато витончених рішень оптимальних з тих чи інших параметрів. Для наочності можна розглянути приклад.

Поняття модуляції пов'язано зі зміною будь-якого параметра одного сигналу (високочастотного) в залежності від іншого (низькочастотного). Існує декілька схем (видів) модуляції, які дозволяють передавати сигнал найкращим чином в тій чи іншій ситуації, але все зводиться до зміни або амплітуди, або частоти або початкової фази сигналу.

Низькочастотний сигнал несе інформацію. Наприклад, в нашому випадку, для простоти, це який-небудь однотональний звук, тобто простий сигнал. Залежно від амплітуди цього сигналу змінюється огибаюча високочастотного сигналу. Високочастотний сигнал називається «несучим», в тому сенсі, що він переносить (несе) інформацію. Іноді можна передавати інформаційний сигнал без процедури модуляції. В реальності ж сигнали

передаються через деяке фізичне середовище, та ще й в умовах завод. Для того щоб успішно передати сигнал застосовується модуляція.

Переконатися в користі модуляції можна виконавши деякі розрахунки. Відомо, що сигнали «по повітрю» передаються в основному за допомогою електромагнітних полів, в яких поширюються хвилі. Випромінюються і приймаються хвилі антенами. Хвилі характеризуються «довжиною хвилі». Дана величина обернена частоті хвилі, яка відповідає частоті сигналу, що передається. Очевидно, що чим більшою є частота, тим менше довжина хвилі. Розміри антен залежать від довжин хвиль з якими вони працюють. Тому чим більше частота сигналу, тим меншого розміру потрібна антена. Наприклад, якщо спробувати передати з гарнітури в телефон звук частотою 4186.0 Гц, то розмір антени складе близько 18 км завдовжки. А якщо використовувати частоти із специфікації Bluetooth (близько 2.4 ГГц), то розмір антени буде 3 см.

Як вже говорилося, схем модуляції існує велика кількість. Однак цифрові схеми модуляції трохи відрізняються від аналогових, частково розглянуті вище. Тому слід звернути увагу і на них. Як і в аналогових схемах, все зводиться до зміни в основному трьох параметрів: частоти, фази і амплітуди, за винятком того, що параметри міняються стрибками. Такого роду модуляцію називають «маніпуляцією» (англ. Shift key). На малюнку нижче представлені схеми амплітудної (ASK), частотної (FSK) і фазової (PSK) маніпуляцій.

У сучасних системах зв'язку велику популярність отримав різновид амплітудної маніпуляції QAM (квадратурна). Суть якої полягає в синтезі сигналу з суми двох простих сигналів, різниця фаз між якими 90 градусів (вони знаходяться в квадратурі). Амплітуди цих простих сигналів змінюються дискретно, що, в кінцевому рахунку, утворює сигнал з дискретною зміною і амплітуди і фази одночасно. Змінюючи схему маніпуляції можна збільшувати або зменшувати швидкість потоку даних. Однак, збільшуючи швидкість, доводиться жертвувати завадостійкістю. У

різних каналах зв'язку застосовується «золота середина». Розглянуті схеми модуляції часто не використовуються в чистому вигляді.

Розробники систем телекомунікацій стикаються з постійною проблемою обмеженого ресурсу середовища передачі, будь то час, простір, частота або код. Тому, при необхідності передачі декількох потоків даних для одного користувача або для декількох доводиться вирішувати завдання множинного доступу до середовища. Іншими словами необхідно так ущільнити потоки або спроектувати такий алгоритм, щоб найкращим чином організувати зв'язок в наявних умовах.

Просторове розділення потоків можна вважати відносно простим вирішенням завдання. Прикладом такого поділу може служити технологія MIMO (англ. Multiple Input Multiple Output), яка повсюдно впроваджується в усі сучасних стандарти мереж. Суть полягає в використанні декількох антен, які разносять один від одного, щоб вони не заважали передачі. Також найбільш простим прикладом просторового поділу може служити обмеження потужності передавачів або адаптивна зміна діаграм спрямованості антен.

Більш поширеною є методика частотного ущільнення. Завдяки цій методиці багато пристроїв функціонують на одній території. На рис. 4.10 наведений принцип частотного ущільнення каналів [19].

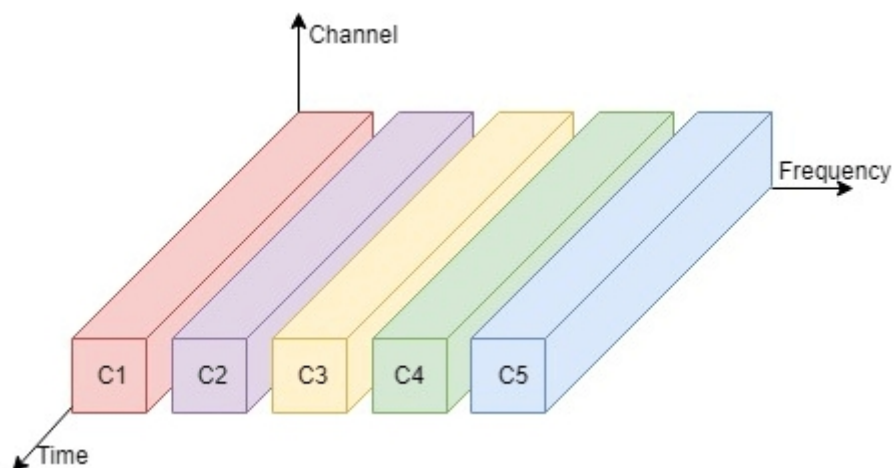


Рисунок 4.10 – Принцип частотного ущільнення каналів

Ця діаграма показує, як розподіляється частотно-часовий і енергетичний ресурси між потоками. Одним з мінусів є необхідність залишати між потоками частотні проміжки, щоб виключити взаємні завади, що не економно використовує частотний ресурс.

Наприклад, при радіомовленні в FM діапазоні використовується мультиплексування FDM. Кожній FM-станції призначається спеціальна частота, яка використовується для мовлення своїх радіопрограм. При використанні мультиплексування FDM кожному каналу виділяється смуга частот. Аналогові сигнали даних, як правило, мультиплексируються за допомогою цього методу. Загальний розподіл частот становить від 87,8 МГц до 108 МГц, розділених на канали шириною 0,2 МГц (рис. 4.11). Розподіл частот FDM не повинно перекриватися і часто має захисні смуги між каналами для мінімізації завад від сусідніх каналів.

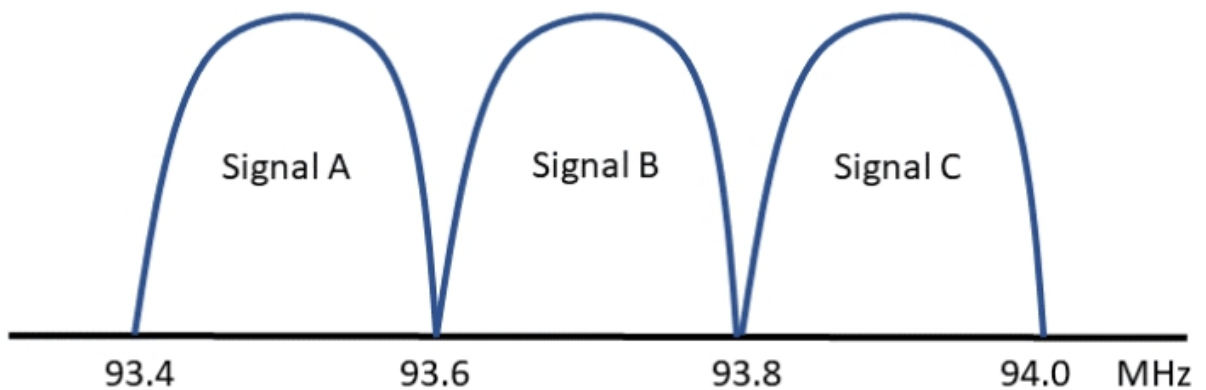


Рисунок 4.11 – Мультиплексування з частотним поділом каналів.

Кращою є техніка часового ущільнення [19].

Передавач працює на одній частоті, але для кожного користувача використовується свій інтервал часу. Дана методика дуже вимоглива до синхронізації між приймачем і передавачем. TDM зручна для динамічної зміни потоків, наприклад, якщо якомусь потоку (абоненту) потрібно

підвищити трафік, то достатньо лише для нього зробити інтервал довший. Найбільш відомим стандартами, які використовують TDM, є GSM.

Кращі характеристики мають системи з кодовим ущільненням каналів.

Потоки співіснують в одному частотно-часовому інтервалі. Для кодування кожного потоку застосовуються спеціальні коди. Кодами CDM є ортогональні сигнали, на які розкладаються символи початкової послідовності. Чому так можна робити, говорилося вище. Це одна з методик розширення спектра. Шумоподібні сигнали і методики розширення спектра є цікавими напрямками в телекомунікаціях.

Існують різні модифікації методики CDM. Наприклад, суміш CDM і FDM дають FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), а з TDM технікою – THSS (Time Hopping Spread Spectrum). Модифікації, володіючи унікальними властивостями, відкривають широкі горизонти застосування CDM. Наприклад, FHSS застосовується в Bluetooth, OFDM.

Для більш коректної термінології потрібно уточнити, що методику ущільнення з метою множинного доступу до середовища декількох користувачів називають multiple access, тому такі техніки називаються FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA, тощо.

В технології OFDM частотний діапазон розбивається рівномірно між піднесучими, кількість яких може доходити до декількох тисяч. Кожному переданому потоку призначається декілька таких піднесучих, тобто кожен потік розбивається на N піднесучих. Піднесучі між собою ортогональні. Ця особливість визначає багато позитивних якостей техніки OFDM.

4.3 Моделі систем зв'язку з OFDM у середовищі Matlab і Simulink

Досліджена Simulink-модель системи зв'язку з BPSK і OFDM модуляцією (рис. 4.12).

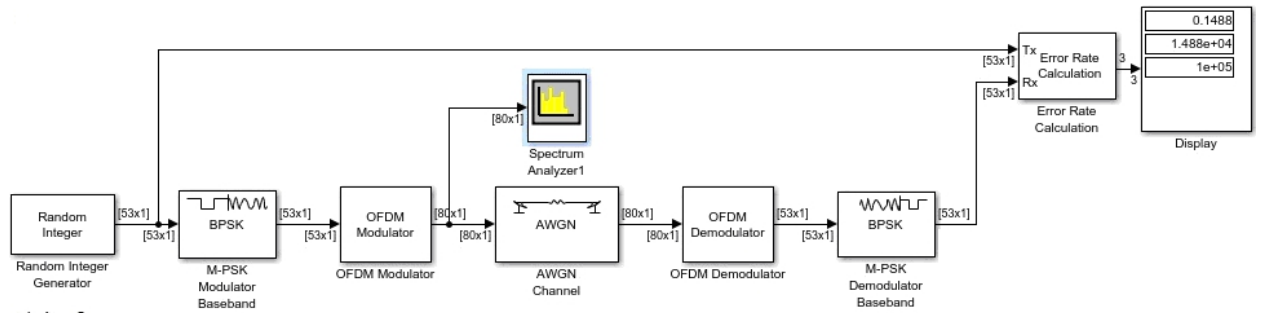


Рисунок 4.12 – Simulink-модель системи зв'язку з BPSK і OFDM

Параметри моделі наступні.

Random Integer Generator: Sample time – 0,1; samples per frame – 53.

BPSK Modulator: Input – Grey; Offset – 0.

OFDM Modulator: FFT length – 64; guard bands – [6;5]; cyclic prefix – 16;
Number OFDM symbols – 1; antenna – 1.

AWGN Cannel: Number bits per symbol – 53; Symbol period – 0,1.

OFDM Demodulator: FFT length – 64; guard bands – [6;5]; cyclic prefix – 16;
Number OFDM symbols – 1; antenna – 1.

BPSK Demodulator: Input – Grey; Offset – 0.

Модель формує сигнал OFDM з 128 піднесучими. Спектр сигналу на виході достатньо широкий. Аналізатор спектра зображений на рис. 4.13.

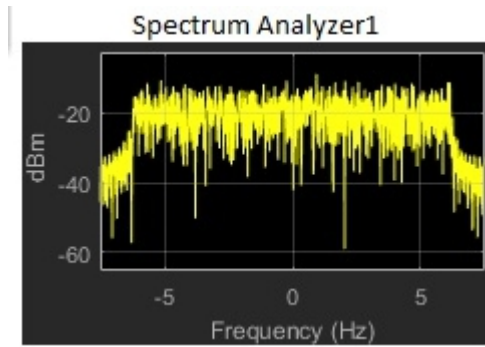


Рисунок 4.13 – Аналізатор спектра для моделі рис. 4.14

Порівняння згорткового коду з OFDM модуляцією

Згортковий код швидкістю 2/3 структурою `poly2trellis([5 4],[23 35 0; 0 5 13])` з декодером Вітербі і модуляцією 16QAM.

Модуляція 16QAM з OFDM і 128 піднесучими. На рис. 4.14 зображені залежності кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум.

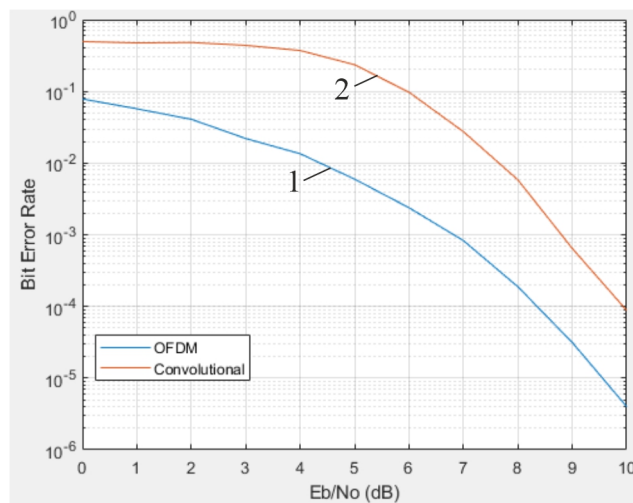


Рисунок 4.14 – Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум (1 – 16QAM+ OFDM; 2 – 16QAM+згортковий код)

З отриманої залежності можна зробити висновок, що модуляція 16QAM з OFDM і 128 піднесучими має енергетичний вигреш у порівнянні з

згортковим кодом швидкістю $2/3$ і структурою $\text{poly2trellis}([5\ 4],[23\ 35\ 0; 0\ 5\ 13])$ і модуляцією 16QAM на 1,5 дБ для значення $\text{BER}=10^{-4}$.

Приклад визначення довжини захисного інтервалу. Нехай використовується одна несуча, а швидкість передачі $V = 100$ Мбіт/с.

При тривалості імпульсу $T_i = 10^{-8}$ с.

Якщо час затримки надходження другого променя дорівнює тривалості імпульсу, то цей промінь накладається на наступний імпульс. Різниця ходу променів дорівнює:

$$S = C T_i = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} = 3 \text{ м.}$$

Simulink-модель цифрової системи зв'язку з модуляцією QPSK і ортогональним частотним поділом каналів приведена на рис. 4.15.

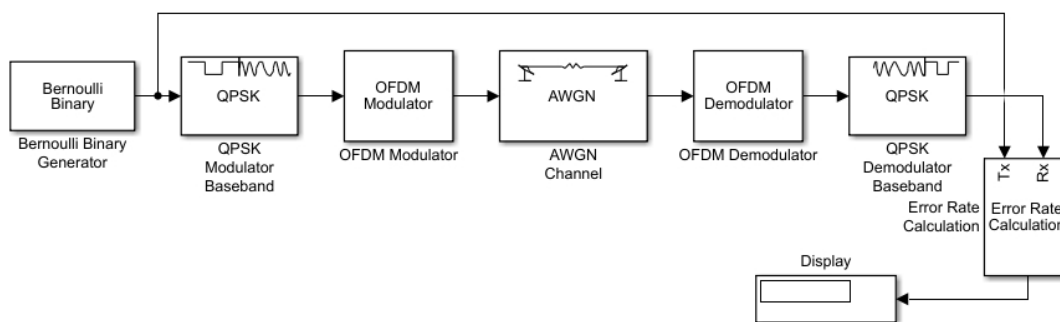


Рисунок 4.15 – Simulink-модель системи зв'язку з модуляцією QPSK і OFDM

Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум для цифрової системи зв'язку з модуляцією QPSK і ортогональним частотним поділом каналів приведено на рис. 4.16.

Кількість піднесучих лівої і правої захисної смуги задано $[6;5]$.

За отриманими залежностями можна зробити висновок, що теоретичні і експериментальні результати збігаються.

Використання захисних інтервалів знижує ефективність методу OFDM.

Технологія OFDM характеризується високим рівнем пік-фактора, що призводить до великих енергетичних витрат.

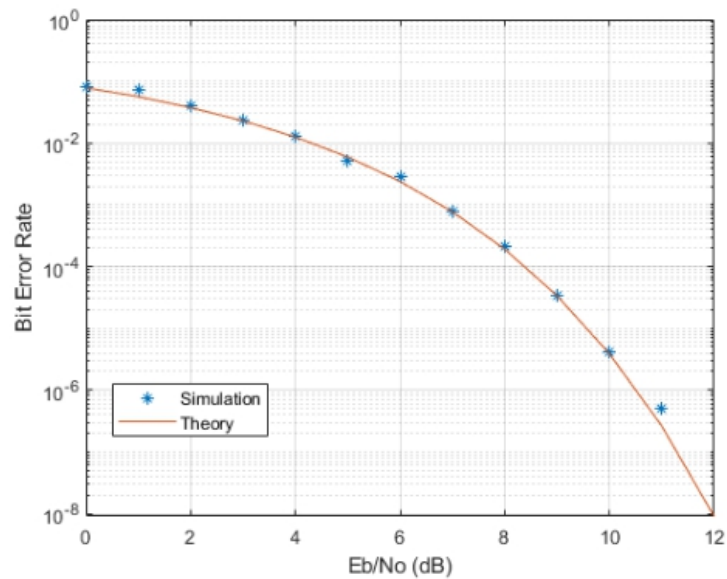


Рисунок 4.16 – Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум для модуляції QPSK і OFDM

Оскільки OFDM має високий пік-фактор (що не припустимо для мобільних станцій), то в LTE використовується SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) - Множинний доступ з частотним поділом каналів і однією несучою частотою.

Висновки до четвертого розділу

1. Кожна під несуча OFDM модулюється за звичайною схемою модуляції на низькій символній швидкості, зберігаючи загальну швидкість передачі даних, як і у звичайних схем модуляції однієї несучої.

2. Основною перевагою OFDM – здатність протистояти складним умовам в каналі. Наприклад, боротися з загасаннями в області високих частот, вузькосмуговими завадами і частотно-вибірковими завмираннями, викликаними багатопроменевим характером поширення. Низька символна швидкість робить можливим використання захисного інтервалу між символами, що дозволяє справлятися з розсіюванням в області часу і усувати міжсимвольну інтерференцію (МСІ).

3. Досліджено застосування згорткового коду і OFDM модуляції. Модуляція 16QAM з OFDM має енергетичний вигравш у порівнянні з згортковим кодом швидкістю $2/3$ і модуляцією 16QAM на 1,5 дБ.

ВИСНОВКИ

1. Схема формування сигналу OFDM виглядає наступним чином. На вхід системи надходить цифровий потік даних, який розбивається на N паралельних потоків, які подаються на окремі модулятори QAM для кожної з N піднесучих. Далі відбувається обернене швидке перетворення Фур'є для ефективного створення форми сигналу в області часу. Результуючий сигнал OFDM в цифровій формі управляє цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП), який перетворює його в аналоговий сигнал. Цей сигнал основної смуги частот зазвичай перетворюється з підвищенням частоти до більш високої частоти (і пісилується за потужністю) перед передачею по ефірному каналу. У приймачі відбувається зворотний процес. Аналоговий перетворювач з пониженням частоти переводить сигнал OFDM в смугу модулюючих частот. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює сигнал в цифрову форму і передає його в блок ШПФ. Блок ШПФ перетворює сигнал з області часу в масив піднесучих, що мають модуляцію QAM. Демодулятори QAM відтворюють потік бітів від кожної піднесучої, який потім мультиплексується для відтворення початкового потоку даних.

2. Досліджено застосування згорткового коду і OFDM модуляції. Модуляція 16QAM з OFDM має енергетичний вигравш у порівнянні з згортковим кодом швидкістю $2/3$ і модуляцією 16QAM на 1,5 дБ.

3. Одною з ключових переваг методу OFDM є поєднання високої швидкості передачі з ефективним протистоянням багатопроменевому поширенню сигналу. OFDM дозволяє усунути ефект міжсимвольної інтерференції. Невід'ємною частиною технології OFDM є поняття охоронного інтервалу - це циклічне повторення закінчення символу, що розташовується спочатку символу. Охоронний інтервал додається до символу в передавачі і відкидається при прийомі символу в приймачі, але саме він служить захистом від виникнення міжсимвольної інтерференції. Наявність охоронного інтервалу створює часові паузи між окремими

символами, і якщо тривалість охоронного інтервалу перевищує максимальний час затримки сигналу в результаті багатопроменевого поширення, то міжсимвольної інтерференції не виникає.

4. Оскільки OFDM має високий пік-фактор (що не припустимо для мобільних станцій), то в LTE використовується SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) - Множинний доступ з частотним поділом каналів і однією несучою частотою.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мелихов С.В. Аналоговое и цифровое радиовещание/С.В. Мелихов.– Томск: Томск гос. Ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012.– 233 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение/ изд. 2-е, испр.; пер. с англ.. Москва: Вильямс, 2003. 1104 с.
3. Прокис Д. Цифровая связь / под ред. Д.Д. Кловского. Москва: Радио и связь, 2000. 800 с.
4. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / К. Феер; пер. с англ. под ред. В.И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
5. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные сети передачи. М.: Техносфера. 2005. 592 с.
6. Gorbenko I.D. Mathematical model of orthogonal frequency distribution and multiplexing (OFDM) signals/ I.D. Gorbenko, O.A. Zamula, V.L. Morozov S.V. Rodionov//Радіотехніка.-2019.-№3.-Р. 32-43.
7. Tikhonov V.I. The scheme of time-frequency scheduling for ofdm radio channel with i/q-phase modulation/ V.I. Tikhonov, A. Taher//Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Матеріали XV науково-техн. конф., 10-14 вересня 2015 р., м. Одеса (Затока)-2015.-С. 82.
8. Абдурахман А. Повышение эффективности LTE с использованием OFDM/OQAM/ А. Абдурахман//Радіотехніка.-2016.-№1/184.-С. 135-141.
9. Замула О. А. Технології формування OFDM сигналів в сучасних інформаційно-комунікаційних системах/ О. А. Замула//Радіотехніка.-2018.-№2/193.-С. 152-158.
10. Коханов А.Б. Использование дискретного преобразования Хартли для OFDM-модуляции/ А.Б. Коханов, М.Ю. Левковская//Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-2014.-№5.-С. 208-210.

11. Айфичер Э.С. Цифровая обработка сигналов / Э.С. Айфичер, Б.У. Джервис. – 2-е изд.: Пер с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.
12. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов и Matlab: учеб. пособие / А.И. Солонина, Д.М. Клионский, Т.В. Меркучева, С.Н. Перов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 512 с.
13. Волков Л.Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики / Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шинаков: Учеб. пособие. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.
14. Шинкарук О.М. Основи функціонування багатоканальних систем передачі інформації : [навч. посібник] / О.М. Шинкарук, Ю.М. Бойко, І.І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – 245 с.
15. 4. Кичак В.М. Визначення бітових спотворень в каналах з прямою корекцією помилок / В.М. Кичак, В.С. Белов, А.С. Белов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 1. – С. 121-124.
16. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / Григорьев В.А., Лагутенко О.И. - М: Котрендз, 2005. - 375 с.
17. Сердюков П.Н. Защищенные радиосистемы цифровой передачи информации /П.Н. Сердюков, А.В. Бельчиков, А.В. Дронов и др. – М.: АСТ, 2006. – 403 с.
18. Бойко Ю.М. Аналіз цифрових методів модуляції/демодуляції в системах зв'язку та передачі інформації// Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький . – 2011. - №1. – С. 99-103.
19. Защищенные радиосистемы цифровой передачи информации / Сердюков П.Н., Бельчиков А.В., Дронов А.В. и др. – М. : АСТ, 2006. – 403 с.
20. Банкет В.Л. Цифровые методы в спутниковой связи / В.Л. Банкет, В.М. Дорофеев. – М. : Радио и связь, 1988. – 240 с.

Додаток А
(довідковий)
Презентація

Слайд 1

Моделювання систем зв'язку з OFDM модуляцією

Трач Б.В., гр. ТРМ-19-1
Керівник – д.т.н., доц. Підченко С.К.

Слайд 2

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження цифрових систем зв'язку з ортогональним частотним поділом каналів.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання.

- провести огляд методів боротьби з багатопроменевим прийманням сигналів у цифрових системах зв'язку;
- розглянути і проаналізувати шкідливі впливи у каналах зв'язку і шляхи їх зменшення;
- дослідити модель системи зв'язку з OFDM модуляцією в середовищі Matlab, оцінити енергетичну ефективність.

Об'єктом дослідження є процес передачі і приймання сигналів з ортогональним частотним поділом каналів у цифрових системах зв'язку .

Предметом дослідження є методи та засоби отримання модуляції з ортогональним частотним поділом каналів у цифрових системах зв'язку .

Слайд 3

Наукова новизна одержаних результатів :

1. Вперше проведена оцінка енергетичної ефективності цифрових систем зв'язку з OFDM модуляцією.
2. Набув подальшого розвитку метод оцінки спотворень модульованого сигналу цифрових систем зв'язку.
3. Отримали подальший розвиток методи ортогонального частотного поділу каналів.

Слайд 4

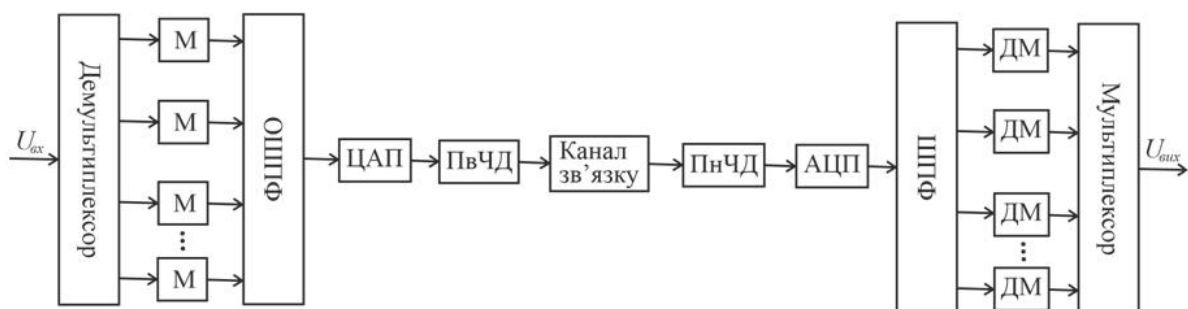
Цифрова система зв'язку з OFDM

Рисунок 4.1 - Цифрова система зв'язку з OFDM

Слайд 5 Часові діаграми сигналів

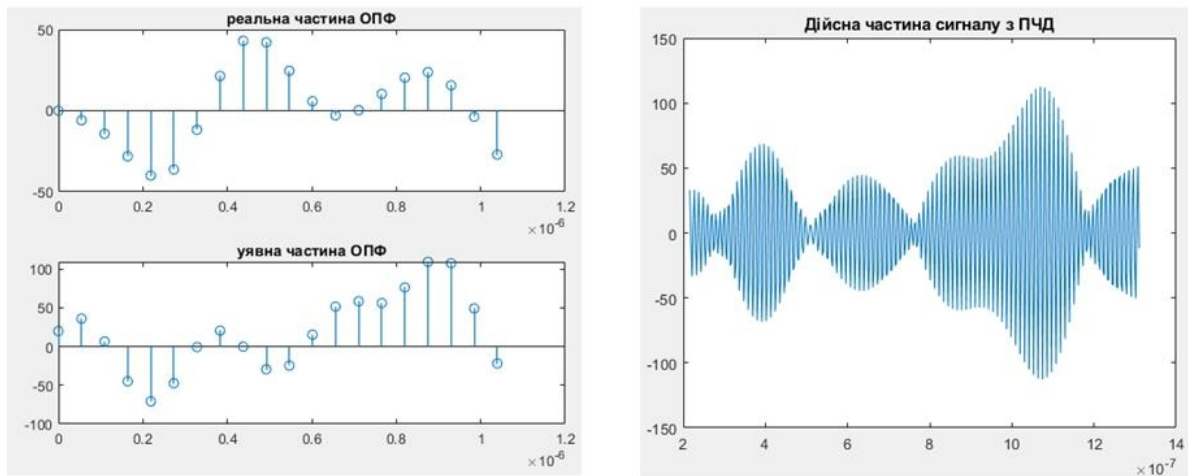


Рисунок 5.1- Сигнал на виході
оберненого швидкого перетворення Фур'є
(ОПФ)

Рисунок 5.2 – Сигнал на виході
підвищуючого
перетворювача частоти дискретизації

Слайд 6 Система зв'язку з BPSK і OFDM

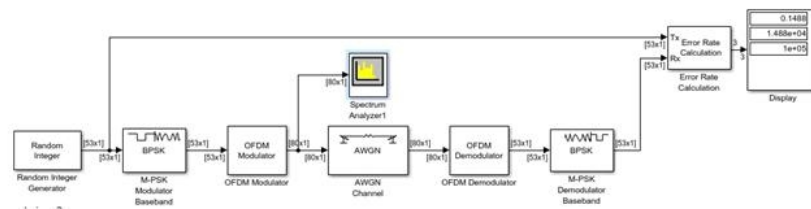


Рисунок 6.1 – Simulink-модель системи зв'язку з BPSK і OFDM

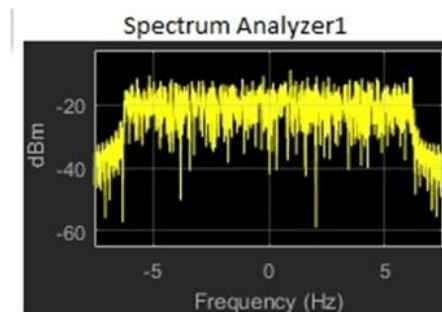


Рисунок 6.2 – Аналізатор спектра

Слайд 7

Модуляція 16QAM з OFDM і 128 піднесучими

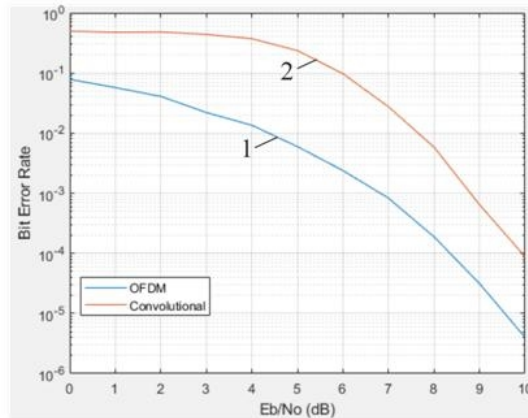


Рисунок 7.1 – Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум (1 – 16QAM+ OFDM; 2 – 16QAM+згортковий код)

Слайд 8

Цифрова системи зв'язку з QPSK і OFDM

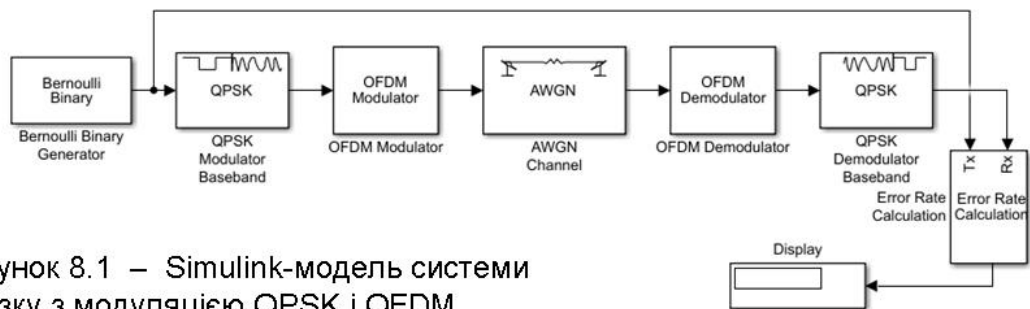


Рисунок 8.1 – Simulink-модель системи зв'язку з модуляцією QPSK і OFDM

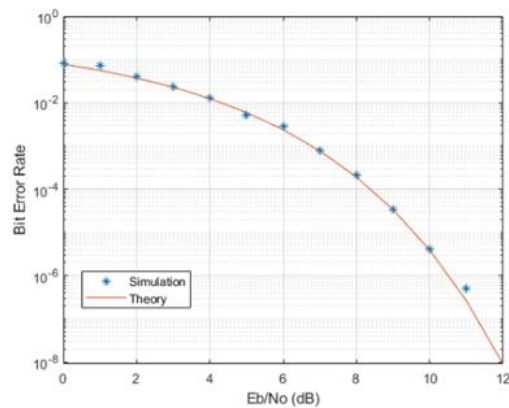


Рисунок 8.2 – Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум для модуляції QPSK і OFDM

Слайд 9

ВИСНОВКИ

1. Досліджено застосування згорткового коду і OFDM модуляції. Модуляція 16QAM з OFDM має енергетичний виграв у порівнянні з згортковим кодом швидкістю 2/3 і модуляцією 16QAM на 1,5 дБ.

2. Одною з ключових переваг методу OFDM є поєднання високої швидкості передачі з ефективним протистоянням багатопроменевому поширенню сигналу. OFDM дозволяє усунути ефект міжсимвольної інтерференції. Невід'ємною частиною технології OFDM є поняття охоронного інтервалу - це циклічне повторення закінчення символу, що розташовується спочатку символу. Охоронний інтервал додається до символу в передавачі і відкидається при прийомі символу в приймачі, але саме він служить захистом від виникнення міжсимвольної інтерференції. Наявність охоронного інтервалу створює часові паузи між окремими символами, і якщо тривалість охоронного інтервалу перевищує максимальний час затримки сигналу в результаті багатопроменевого поширення, то міжсимвольної інтерференції не виникає.

3. Оскільки OFDM має високий пік-фактор (що не припустимо для мобільних станцій), то в LTE використовується SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) - Множинний доступ з частотним поділом каналів і однією несучою частотою.

Додаток Б
(довідковий)
Апробація роботи

Огневий О.В. Проблема верифікації протоколів когерентності пам'яті...	60
Огневий О.В., Огнева А.М. Особливості захисту інформаційних ресурсів під час проведення відеоконференцз'язку	64
Полянчиків В. Г., Гнезділов М. Д., Журавська І. М. Діагностично-тренувальні прилади для відновлення рефлексів ушкоджених кістей та пальців рук	69
Руденко І.В. Інформаційна технологія для класифікації марок автомобілів з використанням згорткової нейронної мережі	72
Слободян М.О., Бабій Д.Р., Підченко С.К. Моделювання хаотичного генератора Лоренца засобами Matlab/Simulink	76
Слюсарчук О.О., Підченко С.К. Математична модель багаточастотної автоколивальної системи як динамічного об'єкта	77
Тогося О. Р. Організація захисту інфраструктури електронної комерції на базі протоколів DoT та DoH	82
Трач Б.В., Підченко С.К. Моделювання систем зв'язку з OFDM модуляцією	85
Чеснюк М.В., Медзатий Д.М. Алгоритм визначення пробудження людини під час сну	90
Шпірук М. С., Пятін І.С. Моделювання спотворень сигналу у каналі передачі і їх впливу на коефіцієнт бітових помилок цифрової системи зв'язку	93

сільського господарства України. 2019–2023. URL: <https://www.me.gov.ua/Documents/Download?id=6deb0289-40af-41ab-91eb-ce7f8d298fc4> (дата звернення: 06.11.2020).

2. Трофименко О. Моніторинг рівня кібербезпеки України у світових рейтингах / О. Трофименко, Ю. Прокоп, Н. Логінова, О. Задерейко // Інформаційна безпека людини, суспільства, держави. – 2019. – № 3 (27). URL: <http://academy.ssu.gov.ua/ua/page/inf-arch.htm> (дата звернення: 06.11.2020).

3. Samson I. Comparative analysis between IPv4 and IPv6 / I. Samson, A. Jamilu // *Int. Journal of Information Systems and Engeneearing*. – 2015. – Vol.2, No. 3. – P.20–26. DOI: 10.24924/ijise/2016.11/v4.iss2/20.26.

4. Кухаренко А. Как настроить расширенную электронную торговлю с помощью Google Tag Manager / А. Кухаренко // *NetpeakJournal*. URL: <https://netpeak.net/ru/blog/kak-nastroit-rasshirennuyu-elektronnyu-torgovlyu-s-pomoshch-yu-google-tag-manager/> (дата обращения: 06.11.2020)

Моделювання систем зв'язку з OFDM модуляцією

Трач Б. В.

Науковий керівник – д.т.н., проф. Підченко С.К.

Хмельницький національний університет

Мультимплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM) - це ефективний формат модуляції, що використовується в сучасних системах бездротового зв'язку, включаючи 5G. OFDM поєднує в собі переваги квадратурної амплітудної модуляції (QAM) і мультимплексування з частотним поділом (FDM) для створення системи зв'язку з високою швидкістю передачі даних. QAM відноситься до цифрових типів модуляції: BPSK (двійкова фазова маніпуляція), QPSK (квадратурна фазова маніпуляція), 16QAM (16-позиційна QAM), 64QAM (64-позиційна QAM).

FDM - це просто ідея про те, що декілька каналів зв'язку можуть співіснувати, призначаючи зріз частотного спектра для кожного каналу. Типовим прикладом цього є FM-радіомовлення: загальний розподіл частот становить від 87,8 МГц до 108 МГц, розділених на канали шириною 0,2 МГц (рис. 1). Розподіл частот FDM не повинно перекриватися і часто має захисні смуги між каналами для мінімізації завад від сусідніх каналів.

Базова концепція OFDM була вперше запропонована Р. У. Чангом, визнавши, що ортогональні сигнали з обмеженою смугою частот можна комбінувати із значним перекриттям, уникаючи при цьому міжканальних завад. Використовуючи OFDM, ми можемо створити масив піднесучих, які працюють разом для передачі інформації в діапазоні частот.

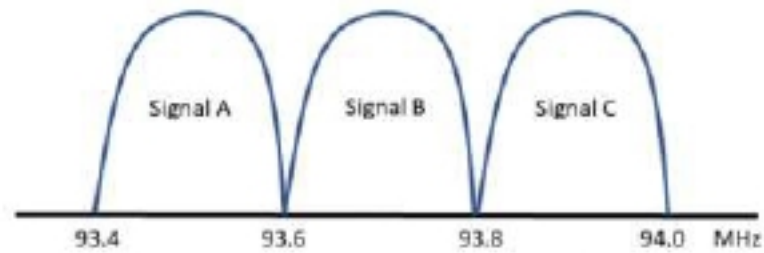


Рисунок 1 – Мультиплексування з частотним поділом каналів

Ці піднесучі повинні бути ортогональними функціями. Точне математичне визначення ортогональності між двома функціями полягає в тому, що інтеграл їх добутку за вказаний інтервал часу дорівнює нулю. У більш широкому сенсі ми можемо розглядати ортогональні функції як статистично не пов'язані.

На рис. 2 показано, як N рівновіддалених піднесучих можна об'єднати для формування масиву паралельних сигналів. Кожна з піднесучих модулюється з використанням QAM. Ці модульовані піднесучі можуть використовуватися для підтримки незалежних сигналів основної смуги частот, але частіше їх комбінують, щоб забезпечити максимальну пропускну здатність для одного потоку даних.

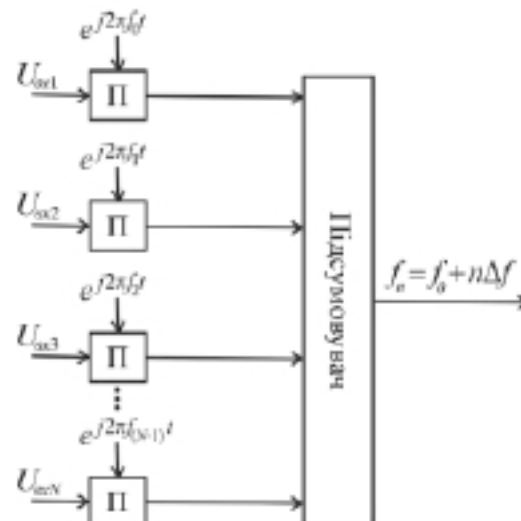


Рисунок 2 – Модулятор OFDM підсумовує сигнали різних частот.

Ми можемо представити ці піднесучі математично, використовуючи комплексну форму, що узгоджується з використанням QAM.

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{j2\pi f_n t},$$

де $f_n = f_0 + n \cdot \Delta f$.

Наведені вище рівняння є безперервними функціями, і системи OFDM реалізовані в аналоговій формі. Однак, сучасні системи майже всі цифрові, в них використовуються новітні технологічні вузли напівпровідників і цифрова обробка сигналів.

Сучасні системи OFDM використовують піднесучі, які існують в дискретній (дискретизованій) формі з частотою дискретизації:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t}$$

З N піднесучими, розділеними

$$\Delta f = \frac{1}{N \Delta t}$$

Для простоти на рис. 3 показані тільки чотири немодульовані піднесучі в області часу. Чорна складова – це несуча (f_0), а інші складові - це піднесучі з більш високими частотами, що рознесені з інтервалом, кратним Δf . Чотири піднесучі OFDM в області часу представлені на рис. 3.

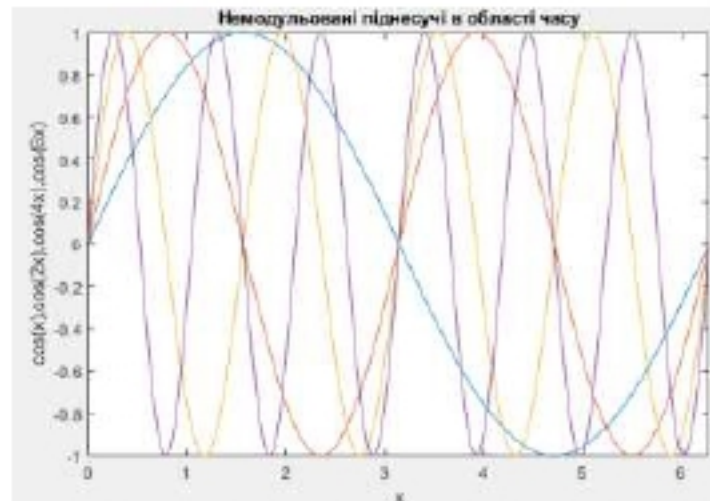


Рисунок 3 – Цей сигнал OFDM містить чотири несучих, розділених відстанню Δf

На рис. 4 показані ці ж піднесучі в частотній області, показані з деякою шириною смуги модуляції, щоб вказати перекриття між піднесучими. Піднесучі ортогональні одна одній і будуть мати мінімальні завади для інших піднесучих, що призведе до ефективного використання смуги пропускання. Зверніть увагу, що амплітуда кожної піднесучої перетинає нуль в центрі інших піднесучих, мінімізуючи вплив сусідніх піднесучих.

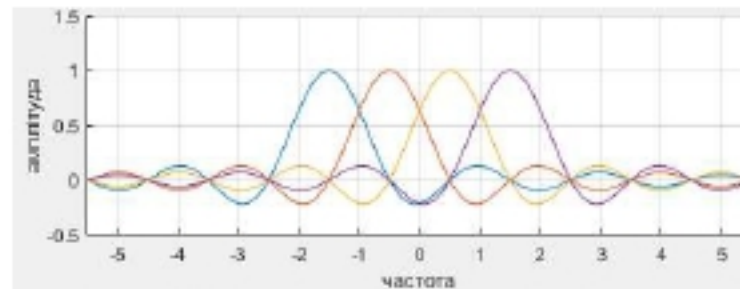


Рисунок 4 – Несучі OFDM-сигналу в області частоти

На рис. 5 показана базова блок-схема повної наскрізної системи OFDM, що складається з передавача і приймача. Бітовий потік надходить в систему зліва на схемі. Як правило, цей єдиний потік бітів демультимплексується (DEMUX) на менші бітові потоки, які подаються на окремі модулятори QAM для кожної з N піднесучих.

Ключовим фактором для OFDM є використання оберненого швидкого перетворення Фур'є (ОШПФ) для ефективного створення сигналу у області часу з масиву модульованих піднесучих. Результуючий сигнал OFDM в цифровій формі управляє цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП), який перетворює його в аналоговий сигнал. Цей сигнал основної смуги частот зазвичай перетворюється з підвищенням частоти (ПвЧД) до більш високої частоти (і, можливо, посилюється) перед передачею по ефірному каналу.

У приймачі процес зворотний. Аналоговий перетворювач з пониженням частоти (ПнЧД) переводить сигнал OFDM назад в смугу модулюючих частот. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює сигнал в цифрову форму і передає його в блок ШПФ. Блок ШПФ перетворює сигнал з області часу назад в масив піднесучих, несучих модуляцію QAM, в області частоти. Демодулятори QAM відтворюють потік бітів від кожної піднесучої, який потім мультимплексується для відтворення початкового одиночного потоку даних.

Таким чином, основні переваги сигналів з OFDM:

- 1) об'єднання множини піднесучих QAM для створення ширококутної системи;
- 2) використання ШПФ і ОШПФ для ефективного перетворення цих

піднесучих в єдиний бездротовий сигнал. Можна використовувати діапазон модуляції QAM, починаючи з BPSK (одні біт на символ) до 256QAM (8 біт на символ). Поєднання цього з використанням множини піднесучих (можливо, 4096) приводить до дуже високих швидкостей передачі даних.

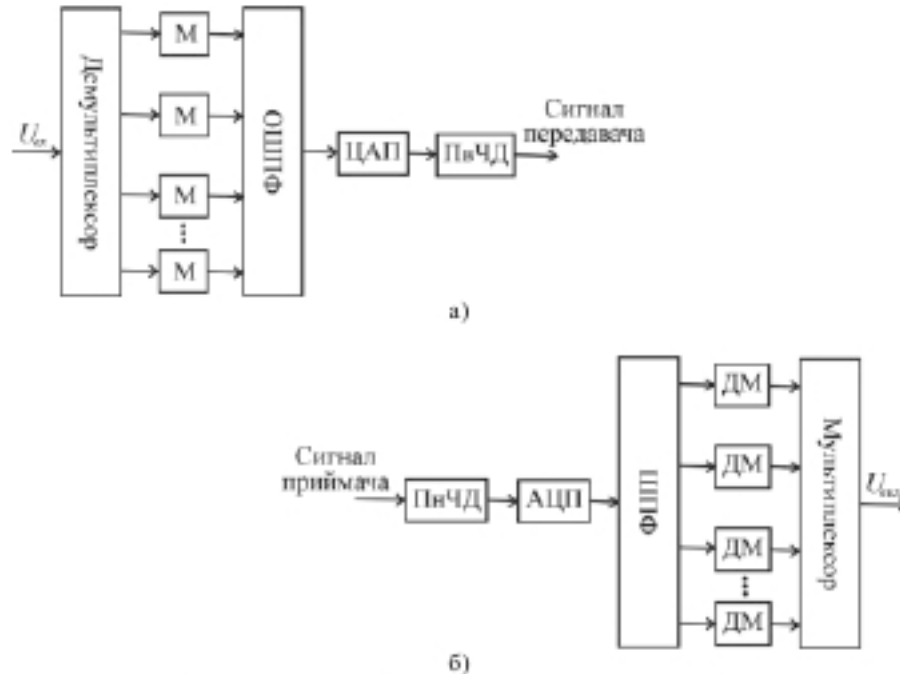


Рис. 5. Цифрова система зв'язку з OFDM: а – передавач; б - приймач (М – QAM модулятор; ОШПФ – обернене швидке перетворення Фур'є; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ПвЧД – підвищуючий перетворювач частоти дискретизації; ПнЧД – понижуючий перетворювач частоти дискретизації; АЦП – аналого-цифровий перетворювач ШПФ – швидке перетворення Фур'є; ДМ – QAM демодулятор)

Перелік посилань

1. Мелихов С.В. Аналоговое и цифровое радиовещание / С.В. Мелихов. – Томск: Томск гос. Ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 233 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение/ изд. 2-е, испр.; пер. с англ. Москва: Вильямс, 2003. 1104 с.
3. Прокис Д. Цифровая связь / под ред. Д.Д. Кловского. Москва: Радио и связь, 2000. 800 с.

Anti-Plagiarism v-15.257**Максимальное совпадение с одним документом 0.0%**Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Ошибок в документах: 7%**

ID: 81553 Название: Моделювання систем зв'язку з OFDM модуляцією Добавлено в БД: 2020-11-29 Авторы: Трач Богдан Вікторович Руководители: Підченко Сергій Костянтинівич Консультанты: Оponentы:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	93570	652	282 (0%)	4 (1%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы



Имя пользователя:
Kafedra TMIT KhNU

Дата проверки:
13.12.2020 19:08:35 EET

Дата отчета:
13.12.2020 19:23:41 EET

ID проверки:
1005445448

Тип проверки:
Doc vs Internet

ID пользователя:
100005657

Название файла: Трач ТРМ-19-1(повторно)

Количество страниц: 87 Количество слов: 14567 Количество символов: 109977 Размер файла: 2.67 MB ID файла: 1005736099

568 слов помечены как "исключенные" и не учитываются в подсчете слов

7.78%
Совпадения

Наибольшее совпадение: 3.37% с Интернет-источником (<http://www.znanius.com/10042.html>)

7.78% Источники из Интернета

142

Страница 89

Поиск совпадений с Библиотекой не производился

ВІДЗИВ

на дипломну роботу другого (магістерського) рівня
студента групи ТРМ-19-1
Трача Богдана Вікторовича

«Моделювання систем зв'язку з OFDM модуляцією»

Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM) - це ефективний формат модуляції, що використовується в сучасних системах бездротового зв'язку. OFDM поєднує в собі переваги квадратурної амплітудної модуляції (QAM) і мультиплексування з частотним поділом каналів (FDM) для створення системи зв'язку з високою швидкістю передачі.

При практичній реалізації цих систем виникає багато проблем. Однією з них є велике відношення пікової потужності до середньої потужності, яке вимагає використання підсилювача високої потужності з великим лінійним діапазоном, щоб уникнути інтермодуляційних ефектів та позасмугових випромінювань. Тому актуальність магістерської роботи не викликає сумнівів.

Метою роботи є дослідження цифрових систем зв'язку з ортогональним частотним поділом в середовищі Matlab. Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

- провести огляд методів боротьби з багатопроменевим прийманням сигналів у цифрових системах зв'язку;
- розглянути і проаналізувати шкідливі впливи у каналах зв'язку і шляхи її зменшення;
- дослідити модель системи зв'язку з OFDM модуляцією в середовищі Matlab оцінити енергетичну ефективність.

Дипломна робота представлена пояснювальною запискою обсягом 90 сторінок складається з чотирьох основних розділів та додатку. Оформлення пояснювальної записки знаходиться на належному рівні.

За змістом робота є завершеною працею та містить достатньо посилань літературу. Викладення матеріалу є послідовним та логічно правильним. Висновок добре обґрунтований. Мова викладення роботи є технічно грамотною, зрозумілою.

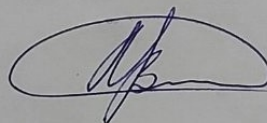
Перевагою даної роботи є проведення оцінки енергетичної ефективності цифрових систем зв'язку з OFDM модуляцією, удосконалення методу оцінки спотворень модульованого сигналу та методів ортогонального частотного поділу каналів.

Серйозних недоліків робота не містить. Присутні незначні неточності, орфографічні та стилістичні помилки, які не впливають на суть роботи.

Вважаю, що дана робота відповідає загальним вимогам щодо дипломних робіт другого (магістерського) рівня, і заслуговує оцінки "добре", а Трач Богдан Вікторович – присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності 172 – "Телекомунікації та радіотехніка".

Рецензент:

Зав. каф. АКІТТ
д.т.н., професор



Мартинюк В.В.

Завідувачу кафедри

ТМІТВіт. Н. доц., Державна С. К.
здобувача вищої освіти (студента

ПІБ, факультет, «курс», «група»)

Триш Б. В., ФІКІС,ТРМ-19-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

04.12.20

дата

Триш

підпис

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ ПО КАФЕДРІ ТМІТ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: «Моделювання систем зв'язку з OFDM модуляцією»

Автор: Трач Богдан Вікторович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: Підченко Сергій Костянтинович

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<i>Відповідає</i>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: Збіги (7,78%), що виявлені в роботі не є плагіатом. Часткові збіги відповідають часто вживаним словосполученням та назвам . Критичних запозичень немає. Дипломна робота допускається до захисту.

11.12.2020 р

Відповідальний за перевірку
на плагіат, к.т.н., доц.



Пивовар О.С.

Зав. каф. ТМІТ
д.т.н. доц.



Підченко С.К.