ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження впливу клімату на супутниковий зв'язок в надзвичайних ситуаціях»

на здобуття освітнього ступеня магістра

зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка

освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Владислав ПЛЕХНЕВИЧ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-61
Владислав ПЛЕХНЕВИЧ

Керівник: Любов БЕРКМАН

Рецензент: _____

Київ – 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра	Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти	Магістр
Спеціальність	172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма	Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія ГАЛАГАН
« » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Плехневичу Владиславу Андрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Дослідження впливу клімату на супутниковий зв'язок в надзвичайних ситуаціях. »,
керівник кваліфікаційної роботи Любов Беркман, д.т.н., професор,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 30.10.2025 р. № 467.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Особливості супутникового зв'язку.
   2. Методи корекції помилок для надійності OFDM.
   3. Зменшення впливу клімату на супутниковий зв'язок.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Особливості супутникового зв'язку.
   2. Методи корекції помилок для надійності OFDM.
   3. Зменшення впливу клімату на супутниковий зв'язок.
5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.
6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	10.09.25	Викон.
2.	Теоретичні аспекти супутникового зв’язку	25.09.25	Викон.
3.	Дослідження принципів побудови супутникового зв’язку	07.10.25	Викон.
4.	Використання OFDM в системах супутникового зв’язку	24.10.25	Викон.
5.	Дослідження методів зменшення впливу клімату на супутниковий зв’язок	28.11.25	Викон.
6.	Висновки, вступ, реферат	10.12.25	Викон.
7.	Розробка презентації	20.12.25	Викон.

Здобувач вищої освіти Владислав ПЛЕХНЕВИЧ

(підпис) *(Ім’я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи Любов БЕРКМАН

(підпис) *(Ім’я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Плехневича Владислава Андрійовича

на тему: «Дослідження впливу клімату на супутниковий зв'язок в надзвичайних ситуаціях»

Актуальність:

Кліматичні зміни дедалі більше впливають на надійність супутникового зв'язку, особливо в умовах надзвичайних ситуацій, коли цей зв'язок критично важливий. Підвищення рівня CO_2 змінює енергетичний баланс атмосфери, що впливає на іоносферу — шар, через який проходять супутникові сигнали. Це може спричинити погіршення якості зв'язку або навіть втрату сигналу. Іоносферні збурення, викликані сонячною активністю або змінами температури, особливо небезпечні для супутників на низьких орбітах, які використовуються для навігації, метеоспостережень і зв'язку. Тому, тема магістерської роботи, є актуальною. Запропонована тема має практичне значення та є доцільною і своєчасною.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показав високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.
2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

Недоліки:

1. З роботи не зрозуміло як було проведені дослідження;
2. Відсутність формалізованої методики вибору параметрів.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «добре», а здобувач Плехневич Владислав Андрійович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Рецензент: ***к.т.н, доцент каф. ТСМ*** Оксана ВАРФОЛОМЄЄВА

(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Плехневич В.А. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Дослідження впливу клімату на супутниковий зв'язок в надзвичайних ситуаціях

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Плехневич Владислав Андрійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Плехневича Владислава Андрійовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Любов БЕРКМАН
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2025 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Плехневич В.А.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедрою
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія ГАЛАГАН
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2025 року

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 94 стор., 26 рис., 5 табл., 28 дж.

Мета роботи - дослідження впливу кліматичних явищ на супутниковий зв'язок.

Об'єкт дослідження - процес кліматичного впливу на якість супутникового зв'язку.

Предмет дослідження – показники якості супутникового зв'язку.

Короткий зміст роботи: В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

У першому розділи розглянуто, що супутниковий зв'язок становить ключовий елемент сучасної телекомунікаційної інфраструктури, адже забезпечує передачу даних на великі відстані, мовлення, навігацію та глобальне підключення.

У другому розділі було представлено використання системи OFDM в супутниковому зв'язку та методи корекції помилок для надійності OFDM.

У третьому розділі представлено, як різні погодні умови впливають на предачу супутникового сигналу та когерентний метод покращення передачі сигналу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: OFDM, СУПУТНИКОВИЙ ЗВ'ЯЗОК, МОДУЛЯЦІЯ (QAM, PSK, AM, ЧМ), ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ, КОРЕКЦІЯ ПОМИЛОК (FEC), АЛГОРИТМ ВІТЕРБІ, ACM (АДАПТИВНЕ КОДУВАННЯ І МОДУЛЯЦІЯ), PAPR (PEAK-TO-AVERAGE POWER RATIO), ОРБІТИ (GEO, LEO, MEO), ЧАСТОТНІ ДІАПАЗОНИ (L, S, C, KU, KA), ІНТЕРЛІВЕР (ПЕРЕМЕЖУВАЧ), CUBESAT.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 90 pages, 26 pictures, 5 table, 28 sources.

The purpose of the work - research into the impact of climate phenomena on satellite communications.

Object of research – the process of climatic influence on the quality of satellite communication.

Subject of research – satellite communication quality indicators.

Summary of the work: The master's work the following results were achieved:

The first section discusses how satellite communications are a key element of modern telecommunications infrastructure, providing long-distance data transmission, broadcasting, navigation, and global connectivity.

The second section presents the use of OFDM in satellite communications and error correction techniques for OFDM reliability.

The third section presents how different weather conditions affect satellite signal transmission and a coherent method for improving signal transmission.

KEYWORDS: OFDM, SATELLITE COMMUNICATION, MODULATION (QAM, PSK, AM, FM), IMMUNITY, FORVARD ERROR CORRECTION (FEC), VITERBI ALGORITHM, ACM (ADAPTIVE CODING AND MODULATION), PAPR (PEAK-TO-AVERAGE POWER RATIO), ORBITS (GEO, LEO, MEO), FREQUENCY BANDS (L, S, C, KU, KA), INTERLEAVER (INTERLEADER), CUBESAT.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 12

ВСТУП 14

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 15

1.1 Особливості супутникового зв'язку 15

1.1.1 Частотні діапазони 15

1.1.2 Модуляція сигналів передавання інформації супутникового зв'язку 20

1.1.3 Завадостійкість систем передавання інформації супутникового зв'язку 24

1.2 Типи супутникових систем 25

1.2.1 Геостаціонарний тип (GEO) 25

1.2.2 Низькоорбітальний тип (LEO) 28

1.2.3 Середньоорбітальний тип (MEO) 30

1.3 Види систем супутникового зв'язку 33

1.3.1 Система супутникового інтернету Starlink 33

1.3.2 Система Inmarsat 35

1.3.3 Система Thuraya 37

2 ВИКОРИСТАННЯ OFDM В СИСТЕМАХ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 39

2.1 Методи корекції помилок для надійності OFDM 41

2.1.1 Використання LDPS-кодів для корекції помилок OFDM 43

2.1.2 Turbo-коди 45

2.1.3 Коди Ріда-Соломона (RS) 48

2.1.4. Згорткові коди (Convolutional Codes) 51

2.1.5 BCH-коди (Bose–Chaudhuri–Hocquenghem) 54

2.1.6 Комбіноване кодування (Concatenated Coding) 56

2.1.7 Інтерлівери (Interleaving) 60

2.1.8 ARQ / HARQ (Automatic Repeat reQuest / Hybrid ARQ) 64

2.1.9 Підтримка адаптивного кодування і модуляції (ACM) 68

2.2 Визначення характеристик сигналів багатоканальних модемів, що забезпечують високошвидкісну передачу інформації 70

2.3 Оптимальне некогерентне приймання сигналів з фазорізницевою модуляцією першого порядку 77

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ КЛІМАТУ НА СУПУТНИКОВИЙ ЗВ'ЯЗОК 84

ВИСНОВКИ 96

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 98

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 101

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

VHF	Very High Frequency - Дуже висока частота
UHF	Ultra High Frequency - Ультрависока частота
GPS	Global Positioning System - Глобальна система позиціонування
VSAT	Very Small Aperture Terminal - Термінал з дуже малою апертурою
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers - Інститут інженерів з електротехніки та електроніки
FSO	Free-Space Optical communication - Оптичний зв'язок у вільному просторі
GEO	Geostationary Earth Orbit - Геостаціонарна навколоземна орбіта
EHF	Extremely High Frequency - Надзвичайно висока частота
AM (АМ)	Amplitude Modulation - Амплітудна модуляція
FM (ЧМ)	Frequency Modulation - Частотна модуляція
PM (ФМ)	Phase Modulation - Фазова модуляція
PSK	Phase Shift Keying - Фазова маніпуляція
QAM	Quadrature Amplitude Modulation - Квадратурна амплітудна модуляція
QoS	Quality of Service - Якість обслуговування
NASA	National Aeronautics and Space Administration - Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору
NSN	Near Space Network - Ближня космічна мережа
TT&C	Tracking, Telemetry, and Command - Відстеження, телеметрія та управління
LEO	Low Earth Orbit - Низька навколоземна орбіта
LDPC	Low-Density Parity-Check - Коди з низькою щільністю перевірок на парність
FEC	Forward Error Correction - Пряма корекція помилок
ACM	Adaptive Coding and Modulation - Адаптивне кодування і модуляція

ISI	Inter-Symbol Interference - Міжсимвольна інтерференція
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Ортогональне частотне мультиплексування
SOVA	Soft-Output Viterbi Algorithm - Алгоритм Вітербі з м'яким виходом
ARQ	Automatic Repeat Request - Автоматичний запит на повторення

ВСТУП

*Актуальність роботи***.** Кліматичні зміни дедалі більше впливають на надійність супутникового зв'язку, особливо в умовах надзвичайних ситуацій, коли цей зв'язок критично важливий. Підвищення рівня CO_2 змінює енергетичний баланс атмосфери, що впливає на іоносферу — шар, через який проходять супутникові сигнали. Це може спричинити погіршення якості зв'язку або навіть втрату сигналу. Іоносферні збурення, викликані сонячною активністю або змінами температури, особливо небезпечні для супутників на низьких орбітах, які використовуються для навігації, метеоспостережень і зв'язку. Дощ, сніг, туман і грози можуть значно послаблювати сигнал супутникового зв'язку, особливо в Ku- та Ka-діапазонах. У дослідженнях з використанням БПЛА-ретрансляторів показано, що вологість, температура та атмосферний тиск впливають на ефективність тропосферного зв'язку, який може бути резервним у надзвичайних ситуаціях. Під час землетрусів, повеней, лісових пожеж чи військових дій наземна інфраструктура часто виходить з ладу. У таких випадках супутниковий зв'язок стає єдиним каналом комунікації. Але саме в ці моменти екстремальні погодні умови можуть знизити ефективність або повністю блокувати супутниковий зв'язок, що ускладнює координацію рятувальних операцій. Згідно з настановами ЗСУ, супутниковий зв'язок є ключовим елементом управління в умовах бойових дій, але його вразливість до кліматичних факторів вимагає резервних рішень та адаптивних технологій. Кліматичні зміни — це не лише екологічна, а й технологічна загроза. Надійність супутникового зв'язку в умовах надзвичайних ситуацій залежить від здатності адаптуватися до нових кліматичних реалій: використання гібридних систем, прогнозування іоносферних збурень, впровадження адаптивних протоколів зв'язку.

*Мета***:** дослідження впливу кліматичних явищ на супутниковий зв'язок.

Об'єкт дослідження - процес кліматичного впливу на якість супутникового зв'язку.

Предмет дослідження - показники якості супутникового зв'язку.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ’ЯЗКУ

1.1 Особливості супутникового зв’язку

Супутниковий зв'язок є критично важливим компонентом сучасної комунікаційної інфраструктури, що забезпечує передачу даних на великі відстані, мовлення, навігацію та глобальне з'єднання.

Супутник — це штучний об'єкт, навмисно розміщений на орбіті навколо Землі або іншого небесного тіла. Супутники служать різним цілям, включаючи зв'язок, моніторинг погоди, навігацію та наукові дослідження. У супутниковому зв'язку ці орбітальні пристрої діють як ретрансляційні станції, які приймають сигнали від Землі, підсилюють їх та передають назад у різні місця.

1.1.1 Частотні діапазони

Супутниковий зв'язок використовує певні частотні діапазони, щоб уникнути перешкод і забезпечити чітку передачу сигналу. Загальні частотні діапазони наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Частотні діапазони супутникових систем зв’язку

Діапазони	Діапазон частот	Застосування
VHF	від 30 до 300 МГц	Використовується для авіації, морського зв’язку, наземних служб безпеки, промисловості та будівництва.

Прдовження таблиці 1.1

Частотні діапазони супутникових систем зв’язку

Діапазони	Діапазон частот	Застосування
UHF	від 300 до 1000 МГц	Використовується для міського радіозв’язку, цифрового телебачення та радіо, Wi-Fi та Bluetooth, мобільного супутнокового радіоаматорського зв’язку,
L-діапазон	від 1 до 2 ГГц	Використовується для GPS, мобільних супутникових телефонів та морського зв'язку.
S-діапазон	від 2 до 4 ГГц	Використовується у метеорологічних супутниках та деяких системах мобільного зв'язку.
C-діапазон	від 4 до 8 ГГц	Поширений у супутниковому телевізійному мовленні та передачі даних, відомий своєю стійкістю до вицвітання під впливом дощу.
X-діапазон	від 8 до 12 ГГц	Використовується переважно для військових та урядових цілей.
Ku-діапазон	від 12 до 18 ГГц	Широко використовується для супутникового.

Продовження таблиці 1.1

Частотні діапазони супутникових систем зв’язку

Діапазони	Діапазон частот	Застосування
K-діапазон	від 18 до 26,5 ГГц	Використовується для супутникових знімків високої роздільної здатності та деяких комунікаційних послуг. Цей діапазон має вищу частоту, що може забезпечити більшу швидкість передачі даних, але він більш схильний до атмосферного ослаблення, такого як затухання від дощу.
Ka-діапазон	від 26,5 до 40 ГГц	Пропонує високу швидкість передачі даних, що підходить для високошвидкісного інтернету, широкосмугових послуг та нових застосувань у мережах 5G завдяки великій доступній пропускній здатності. Ka-діапазон підтримує високопродуктивні супутникові канали, що робить його ідеальним для надання широкосмугових послуг споживачам, бізнесу та мобільним платформам.

Космічні апарати NASA, які використовують урядові діапазони S-, X- та Ka-діапазонів, можуть використовувати ближню космічну мережу NASA (NSN). Основні частотні діапазони S, X та Ka є більш вигідними, ніж використання UHF-діапазону, який має вищу ймовірність локальних перешкод. Супутникове

відстеження, телеметрія та управління (TT&C) зазвичай здійснюється через S-діапазон. Космічні апарати, що не належать NASA, мають доступ до широкого спектру наземних систем, починаючи від послуг "зроби сам" і закінчуючи послугами з оплатою за пропуск.

У L-діапазоні CubeSat можуть використовувати переваги традиційних комунікаційних мереж, таких як Globalstar та Iridium, використовуючи спеціалізовані мережеві транспондери для передачі інформації на Землю та з неї. Ці мережі усувають залежність від спеціалізованого обладнання наземних станцій. Однак їх можна використовувати лише на орбітальних висотах нижче сузір'я зв'язку та вимагають експериментального дозволу на частоту. Системи зв'язку Ku-, K- та Ka-діапазонів є найсучаснішими для великих космічних апаратів, особливо для зв'язку між космічними апаратами, але це все ще молоді технології у світі CubeSat. Вони стають все більш привабливими для розробників малих супутників, оскільки нижчі частоти стають більш перевантаженими. На вищих частотах згасання сигналу від дощу стає значною проблемою для зв'язку між космічним апаратом та Землею Тим не менш, переваги роботи на вищих частотах виправдали подальші дослідження як промисловістю, так і урядом [1].

У супутниковій системі C-діапазону наземна станція або VSAT передає на частоті 6 ГГц. Супутник приймає цей сигнал 6 ГГц і перетворює його на 4 ГГц за допомогою бортового гетеродина частотою 2225 МГц. Вузол або наземна станція містить антену розміром від 7,5 до 11,2 метрів. VSAT містить антену розміром 3,7 або 4,2 метра. Супутник зазвичай має 12 транспондерів, кожен з яких має смугу пропускання 36 МГц. Загальна доступна смуга пропускання становить близько 500 МГц. Для супутників C-діапазону висхідна частота знаходиться в діапазоні від 5925 до 6425 МГц, тоді як частота низхідного каналу — в діапазоні від 3700 до 4200 МГц. Для супутників діапазону Ku висхідний канал знаходиться в діапазоні від 14 до 14,5 ГГц, тоді як низхідний канал — від 11,45 до 11,7 ГГц [2].

Більшість систем зв'язку космічних апаратів базуються на радіочастотах. Зазвичай вони працюють у визначених радіодіапазонах Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) від 300 МГц до 40 ГГц. Радіочастотна

система здійснює зв'язок, надсилаючи дані за допомогою електромагнітних хвиль до антен та від них. Інформація модулюється на радіочастотні електромагнітні хвилі та надсилається по каналу через атмосферу або космічний простір до приймальної системи, де вона демодулюється.

Хоча радіочастотні системи зазвичай використовуються для низькошвидкісного космічного зв'язку, останні розробки в галузі FSO-зв'язку зробили його переконливою альтернативою радіочастотним системам, особливо для високошвидкісного зв'язку. FSO-системи складаються з передавального терміналу та приймального терміналу. Як і в радіочастотній системі, інформація модулюється на електромагнітні хвилі (на оптичних частотах) та надсилається по каналу до приймальної системи. FSO-канали працюють на набагато вищій частоті, ніж радіочастотні канали, зазвичай у ближніх інфрачервоних діапазонах (наприклад, 1064 нм або 1550 нм). Видиме світло часто не використовується через проблеми безпеки очей техніків на терміналах. Використання вищих частот і ширших смуг пропускання може підтримувати вищі швидкості передачі даних, але коротші довжини хвиль також призводять до вужчої ширини променя, що вимагає точніше та точніше наведення на комунікаційний термінал.

У безпроводовій системі на основі супутникового зв'язку інформація (голос, дані, зображення, відео) передається за допомогою мікрохвильової радіочастоти за допомогою параболічної антени. Нижче наведено мережеві топології, що підтримуються в супутниковому зв'язку.

Точка-точка: прямий зв'язок між двома наземними станціями через супутник.

Точка-багатоточка: Одна наземна станція транслює на кілька приймачів. Супутниковий інтернет використовує ту саму топологію.

Мережева топологія: наземні станції зв'язуються безпосередньо через супутник без необхідності центрального вузла.

Супутник на геостаціонарній орбіті (GEO) знаходиться на висоті 35786 км над землею, і один супутник може здійснювати зв'язок на великі відстані понад 21000 км на землі, що може охопити 42,4% поверхні планети. З трьома супутниками можна охопити всю поверхню планети та прилеглий космічний

простір, за винятком...регіони з полярними широтами вище 76°. Супутниковий зв'язок менше обмежений географічними умовами. Незалежно від того, чи це великі міста, чи віддалені гірські райони чи острови, лінії зв'язку можна будувати будь-де, станції можна будувати швидко, а мережа є гнучкою.

Супутникові канали зв'язку можуть використовувати L, S, C, Ku, Ka, надвисокочастотний (UHF), X, надзвичайно високий (EHF) та інші діапазони частот, а також постійно розвиваються діапазони частот Q та V. Потенціал лазерного зв'язку та пропускної здатності одного супутника покращується кожні кілька років. Супутникові канали зв'язку - це зв'язок прямої видимості з поширенням у вільному просторі. Втрати передачі є відносно стабільними та можуть бути точно оцінені. Вартість зв'язку не залежить від відстані та особливо підходить для послуг зв'язку на великих відстанях та в районах з рідкою людською діяльністю.

1.1.2 Модуляція сигналів передавання інформації супутникового зв'язку

Модуляція сигналів в супутниковому зв'язку — це процес кодування цифрової інформації в аналоговий радіосигнал, який передається через супутник між земними станціями. У супутниковому зв'язку використовуються три основні схеми модуляції, кожна з яких має свої особливості, що роблять її придатною для різних потреб зв'язку. До них належать амплітудна модуляція (AM), частотна модуляція (ЧМ) та фазова модуляція (ФМ). Хоча ці методи широко застосовувалися в ранніх космічних місіях, сучасні досягнення в космічному зв'язку призвели до розробки більш досконалих методів, таких як квадратурна амплітудна модуляція (QAM) та методи розширеного спектру, які підвищують пропускну здатність даних та підвищують надійність ліній зв'язку в умовах перешкод та шуму. Кожна схема модуляції має свої сильні сторони та обмеження, які впливають на її придатність для конкретних космічних місій, починаючи від простої телеметрії до складних передач даних у глибокий космос. Методи модуляції не тільки служать для кодування інформації в сигнал несучої, але й

допомагають оптимізувати використання пропускної здатності, споживання енергії та цілісність даних. Наприклад, у космічних місіях, де доступна потужність космічного корабля часто обмежена, необхідні ефективні методи модуляції, щоб забезпечити передачу сигналів з мінімальним споживанням енергії, зберігаючи при цьому високу точність даних. Коли космічний корабель віддаляється від Землі, затримки в часі зв'язку значно зростають, що може ускладнити передачу в режимі реального часу. Тому схеми модуляції повинні бути оптимізовані для таких передач на великі відстані, щоб запобігти втраті або погіршенню сигналу.

Амплітудна модуляція (АМ) – один із найпростіших і найдавніших методів модуляції, що використовуються в системах зв'язку. В АМ амплітуда несучої хвилі змінюється прямо пропорційно амплітуді вхідного сигналу, який може представляти будь-який тип інформації, такої як дані телеметрії або голосові сигнали. Зі зміною амплітуди вхідного сигналу відповідно змінюється і амплітуда несучого сигналу, кодуючи інформацію. Хоча АМ відігравала важливу роль на ранніх етапах космічного зв'язку, вона більше не є кращим вибором для сучасних космічних місій. Зі зростанням складності космічних місій, попит на вищі швидкості передачі даних, більшу ефективність і надійніші канали зв'язку призвів до впровадження більш досконалих методів модуляції. Проста конструкція та легкість впровадження АМ були затьмарені її вразливістю в складних середовищах, таких як космос, де погіршення сигналу та обмеження потужності є постійними проблемами.

Хоча амплітудна модуляція (АМ) значною мірою витіснена більш досконалими методами сучасного супутникового зв'язку, її основними перевагами в історичному контексті та конкретних нішевих застосуваннях були простота реалізації, що призводило до зниження вартості обладнання, та придатність для передачі основних даних, таких як телеметрія. Вона була ефективною для ранніх місій зі скромними вимогами до даних і пропонувала простий спосіб модуляції та декодування сигналів порівняно з більш складними схемами. АМ передбачає зміну амплітуди несучої хвилі для передачі інформації. У супутниковому зв'язку АМ використовувалася для ранніх телевізійних трансляцій через супутники. Однак

вона дуже чутлива до шуму та перешкод, що робить її менш придатною для сучасних систем супутникового зв'язку. Її значною мірою замінила цифрова модуляція. Основними недоліками амплітудної модуляції (АМ) у супутниковому зв'язку є низька ефективність використання потужності та пропускної здатності, схильність до шуму та перешкод, що призводить до поганої якості сигналу.

Оскільки інформація, що несе амплітуду, дуже легко піддається впливу електромагнітних перешкод, АМ вимагає складного приймача та значної потужності, що робить її непридатною для високоточних та ефективних сучасних супутникових систем.

Частотна модуляція (ЧМ) – це широко використовуваний метод модуляції в космічному зв'язку. У ЧМ частота несучого сигналу змінюється відповідно до інформації, що передається, тоді як амплітуда сигналу залишається постійною. Це робить ЧМ більш стійкою до шуму порівняно з амплітудною модуляцією (АМ), оскільки інформація кодується у частотних варіаціях, які менш схильні до перешкод, ніж зміни амплітуди. Цей метод особливо корисний для аналогових сигналів, що робить його популярним вибором для передачі телеметричних даних та голосового зв'язку в космічних місіях.

Частотна модуляція (ЧМ) забезпечує супутниковому зв'язку чудову стійкість до шуму та перешкод, що призводить до кращої якості сигналу та чіткішого звуку. Вона також дозволяє ефективніше використовувати потужність, підтримуючи постійну амплітуду, а її стійкість до коливань амплітуди спрощує використання ефективних нелінійних підсилювачів потужності в передавачах. Однак ключовим недоліком є її вимога до високої пропускної здатності, що обмежує спектральну ефективність порівняно з іншими методами модуляції. Основними недоліками частотної модуляції (ЧМ) у супутниковому зв'язку є високі вимоги до пропускної здатності та необхідність складного, дорогого обладнання як для передавачів, так і для приймачів, що призводить до вищої загальної вартості системи. ЧМ-сигнали також мають менший ефективний діапазон, ніж інші методи модуляції, і можуть бути схильні до перешкод у певних сценаріях, що обмежує їх використання для певних супутникових застосувань.

Квадратурна амплітудна модуляція (QAM) в супутниковому зв'язку — це метод цифрової передачі даних, що поєднує зміну амплітуди та фази несучого сигналу, дозволяючи передавати більше даних за той самий час у порівнянні з простими амплітудною або фазовою модуляцією. Завдяки цьому, QAM забезпечує вищу швидкість передачі, що є критично важливим для сучасних супутникових систем, де ефективне використання каналу зв'язку має велике значення. QAM поєднує дві модуляційні схеми - амплітудну модуляцію (AM) та фазову маніпуляцію (PSK) - для кодування інформації в несучу хвилю. Його називають "квадратурним", оскільки фаза однієї з двох несучих хвиль зміщується на 90 градусів відносно іншої, що дозволяє одночасно передавати два незалежні потоки сигналів через один частотний канал. Ця унікальна властивість QAM — маніпулювати як амплітудою, так і фазою несучої хвилі — дозволяє передавати більшу кількість даних порівняно з техніками, які змінюють лише один аспект хвилі. У QAM передача даних здійснюється шляхом модифікації амплітуди двох хвиль, зазвичай синусоїдальних, шляхом кодування сигналу як на компоненті в фазі (I), так і на компоненті в квадратурній фазі (Q). Ця подвійна стратегія кодування дозволяє кодування декількох бітів на символ, значно збільшуючи пропускну здатність даних.

Переваги квадратурної амплітудної модуляції (QAM) у супутниковому зв'язку включають високу спектральну ефективність, високу швидкість передачі даних та гнучкість адаптації до середовищ з обмеженою пропускною здатністю, що робить її ідеальною для ефективної передачі великих обсягів даних через обмежений доступний частотний спектр. Використання QAM як амплітудної, так і фазової модуляції дозволяє їй передавати більше бітів на символ, тим самим збільшуючи пропускну здатність даних, а її ортогональні несучі забезпечують ефективне відновлення даних. Основними недоліками квадратурної амплітудної модуляції (QAM) у супутниковому зв'язку є її висока чутливість до шуму та перешкод, що посилюється в і без того складному супутниковому середовищі. QAM також вимагає суворо лінійних підсилювачів потужності, які є менш ефективними та споживають більше енергії, а також вимагає точної синхронізації

несучих для належної демодуляції. Крім того, QAM може бути чутливою до міжсимвольних перешкод (ISI) у каналах із багатопроменевим згасанням, що вимагає складних методів вирівнювання для підтримки цілісності сигналу.

1.1.3 Завадостійкість систем передавання інформації супутникового зв'язку

Завадостійкість систем предавання інформації супутникового зв'язку — це здатність систем супутникового зв'язку ефективно працювати в умовах наявності перешкод, що впливають на якість сигналу. Вона досягається шляхом використання технологій кодування та корекції помилок, які дозволяють виявляти та виправляти помилки в даних, викликані шумами, перешкодами або іншими факторами. Також на завадостійкість впливає вибір частотного діапазону та використання потужних передавачів, що робить зв'язок більш стійким до зовнішніх впливів. Як рішення для вирішення проблеми безперебійного зв'язку в супутникових мережах, впроваджується стійка модель зв'язку для негайного реагування на природні пошкодження або навмисні атаки. Метою запропонованої моделі є досягнення найвищої стійкості мережі в рамках практичних обмежень. Під час проектування моделі використовується метод кластеризації для полегшення зв'язку в супутникових мережах. Крім того, стійкість мережі вимірюється відповідно до комплексної оцінки, яка описує роботу мережі з точки зору надійності, доступності та якості обслуговування (QoS). Протокол маршрутизації на основі кластерів розроблено за допомогою динамічного програмування та глибокого навчання з підкріпленням. Він може швидко вживати стійких заходів до загроз, одночасно зменшуючи затримку зв'язку та економлячи мережеві ресурси [3].

Завадостійкість супутникового зв'язку використовується для забезпечення надійності та живучості зв'язку, особливо у віддалених, постраждалих від стихійних лих або військових середовищах, де наземні мережі недоступні або скомпрометовані. Він забезпечує захист від глушіння, перехоплення та фізичних пошкоджень, створюючи стійкий та безпечний канал зв'язку для критично

важливих функцій, таких як реагування на надзвичайні ситуації, національна безпека та глобальні бізнес-операції. Завадостійкість супутникового зв'язку також використовується в районах, вразливих до стихійних лих та конфліктів, таких як віддалені або гірські регіони, під час стихійних лих та для військових операцій, де наземні мережі можуть вийти з ладу. Вона забезпечує надійний канал зв'язку для реагування на надзвичайні ситуації, ліквідації наслідків стихійних лих, а також стратегічного та тактичного командування та управління в складних умовах. Властива супутникам стійкість забезпечує зв'язок, коли наземні системи під загрозою.

Загалом завадостійкість — це ключова характеристика супутникового зв’язку, що робить його надійним і придатним для використання в критичних умовах.

1.2 Типи супутникових систем

1.2.1 Геостаціонарний тип (GEO)

Геостаціонарний тип супутникової системи – це система, де супутники обертаються на геостаціонарній орбіті, що дозволяє їм залишатися над однією й тією ж точкою Землі, що забезпечує постійне покриття певної території для зв'язку, телебачення та інших комунікаційних послуг. Термін “геостаціонарний” походить від того факту, що супутник здається майже нерухомим на небі для наземного спостерігача. Ці супутники роблять один оберт приблизно за 24 години, що дорівнює часу, необхідному Землі для одного оберту навколо своєї осі. Супутник здається нерухомим з точки зору людини на землі, оскільки він рухається синхронно з обертанням Землі. Геостаціонарні супутники оснащені транспондерами , які приймають, підсилюють та ретранслюють радіосигнали на Землю та з неї. Ці сигнали можуть використовуватися для широкого кола застосувань, включаючи телекомунікації, мовлення, дистанційне зондування та навігацію. Геостаціонарна орбіта є особливим випадком геосинхронної орбіти.

Вона розташована над екватором Землі (нахил орбіти до екватора дорівнює 0°), на постійній висоті 35786 км над рівнем моря (ексцентриситет дорівнює 0). Саме така висота забезпечує супутнику період обертання, рівний сидеричному періоду обертання Землі (23 години 56 хвилин). Тобто, супутник обертається навколо планети з кутовою швидкістю, що дорівнює кутовій швидкості обертання Землі навколо своєї осі й начебто непорушно зависає в небі. Орбіта застосовується для розташування комунікаційних, телетрансляційних та ін. штучних супутників. Сьогодні на геостаціонарній орбіті нараховується 402 діючих супутників.

Геостаціонарний супутник підтримує своє положення в космосі відносно обертання Землі за допомогою двигунів та реактивних коліс. Ці інструменти дозволяють супутнику вносити невеликі корективи у своє положення за потреби, щоб підтримувати свою орбіту з тією ж швидкістю, що й обертання Землі, та залишатися в тому ж положенні над екватором Землі. Оскільки геостаціонарні супутники завжди знаходяться над одним місцем, вони також можуть бути корисними для зв'язку (телефони, телебачення, радіо). Супутники GOES, створені та запущені NASA та експлуатуються Національним управлінням океанічних і атмосферних досліджень, забезпечують пошуково-рятувальний маяк, який допомагає знаходити судна та літаки, що зазнають лиха. Зрештою, багато супутників на високій навколоземній орбіті стежать за сонячною активністю. Супутники GOES несуть великий контингент приладів «космічної погоди», які роблять знімки Сонця та відстежують магнітні та радіаційні рівні в космосі навколо них [4]. Інші орбітальні «золоті точки», одразу за високою навколоземною орбітою, – це точки Лагранжа. Точки Лагранжа (або L-точки) — це п'ять позицій у просторі навколо двох великих космічних тіл, наприклад, Сонця та Землі, де гравітаційні сили цих двох тіл і центробіжна сила збалансовані, дозволяючи невеликому об'єкту залишатися відносно нерухомим. Ці точки є розв'язками задачі трьох тіл і мають велике значення для космічних досліджень, оскільки дозволяють розміщувати там космічні апарати та станції. У точках Лагранжа сила тяжіння Землі компенсує силу тяжіння Сонця. Все, що розміщено в цих точках, відчуватиме однакове притягнення до Землі та Сонця та обертатиметься разом із Землею навколо Сонця.

З п'яти точок Лагранжа в системі Сонце-Земля лише дві останні, які називаються L4 та L5, є стабільними. Супутник у трьох інших точках подібний до кулі, збалансованої на вершині крутого пагорба: будь-яке незначне збурення виштовхне супутник з точки Лагранжа, як кулю, що котиться з пагорба. Супутники в цих трьох точках потребують постійного коригування, щоб залишатися збалансованими та на місці. Супутники в двох останніх точках Лагранжа більше схожі на кулю в мисці: навіть якщо вони збурені, вони повертаються до точки Лагранжа.

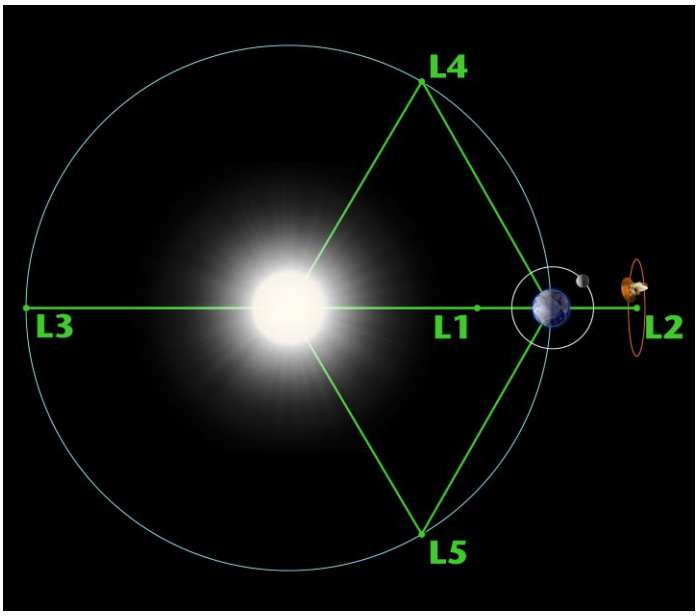


Рис.1.1 Точки Лагранжа

Геостаціонарні супутникові системи використовуються насамперед для зв'язку (радіо, телебачення, інтернет) та моніторингу завдяки своїй можливості постійно перебувати над однією точкою Землі. Їхнє незмінне положення дозволяє забезпечувати стабільне та безперервне покриття, що робить їх ідеальними для передачі сигналів на великі відстані та спостереження за територіями. Геостаціонарні супутники є основою для передачі телевізійних сигналів, телефонного зв'язку та супутникового інтернету, що дозволяє забезпечувати зв'язок у віддалених або важкодоступних регіонах. Також вони використовуються в метеороллогії для моніторингу погоди та природних явищ, надаючи постійні дані про стан атмосфери та поверхні Землі.Частково геостаціонарну систему використовують для навігації, хоча більшість систем позиціонування (як-от GPS) використовують інші типи орбіт, геостаціонарні супутники можуть доповнювати

їх для покращення точності або забезпечення покриття в певних зонах. Такі супутники допомагають у моніторингу навколишнього середовища, сільського господарства та вивченні поверхні Землі завдяки постійному спостереженню за одними й тими ж районами.

1.2.2 Низьклоорбітальний тип (LEO)

Низькоорбітальний супутниковий зв'язок — це система, що використовує супутники на низьких орбітах (LEO - Low Earth Orbit) для передачі даних, забезпечуючи зв'язок там, де немає традиційної наземної інфраструктури. Супутники в LEO, на відміну від геостаціонарних, знаходяться на відносній близькості до Землі, що дозволяє зменшити затримки сигналу та підвищити швидкість передачі даних, хоча й вимагає використання великої кількості супутників для постійного покриття. Супутникові мережі LEO зв'язуються з наземними пристроями Інтернету речей безпосередньо або через шлюзи. Вони використовують менші антени та потребують менше енергії, що робить їх розгортання та експлуатацію дешевшими, а також дозволяє скоротити терміни запуску та експлуатації. Розташовані в регіонах із загалом меншою кількістю космічного сміття, супутники LEO менш схильні до перешкод, що ще більше підвищує їхню надійність. Тим не менш, важливо зазначити, що підключення працює лише за умови прямого з’єднання в межах прямої видимості. Приймачам, встановленим на об’єктах на Землі, потрібне пряме з’єднання із супутником для зв’язку.

Даний тип супутникового зв’язку має деякі особливості, такі як:

Низька затримка: Через близькість супутників LEO до Землі час поширення комунікаційних сигналів коротший, що робить низьку затримку значною перевагою цієї системи зв'язку. Це має вирішальне значення для програм реального часу, таких як голосові дзвінки, онлайн-ігри та інші програми, чутливі до затримки.

Висока пропускна здатність: Системи супутникового зв'язку на низькій орбіті (LEO) зазвичай пропонують вищу пропускну здатність, що вигідно для

підтримки передачі даних великої ємності, потокового відео високої чіткості та інших широкосмугових застосувань.

Глобальне покриття: Завдяки орбітальним характеристикам супутників на низькій навколоземній орбіті (LEO), вони можуть досягати глобального покриття зв'язку без географічних обмежень. Це забезпечує життєздатне рішення для зв'язку у віддалених районах або місцях, таких як океани.

Гнучка архітектура: Системи супутникового зв'язку на низькій орбіті (LEO) часто мають гнучку архітектуру, що дозволяє швидке розгортання та розширення. Це робить їх придатними для різних застосувань, включаючи екстрений зв'язок під час стихійних лих та тимчасові потреби зв'язку.

Супутник на низькій навколоземній орбіті (LEO) зазвичай розташовується на висоті від 500 до 2000 км над Землею. Ці супутники мають обмежене поле зору, що означає, що для забезпечення повного покриття Землі потрібна велика кількість супутників LEO. На відміну від супутників на геостаціонарній орбіті (GEO), які залишаються нерухомими, супутники LEO підтримують орбітальну швидкість 7,3 км/с на висоті близько 1000 км. Для забезпечення безперервного зв'язку необхідні кілька наземних антен - зазвичай дві або три - для передачі та відстеження. Однак, через нижчі вимоги до коефіцієнта посилення, ці антени менші за ті, що використовуються для геосупутників, з максимальним діаметром 2,4 м. Супутники низької навколоземної орбіти (LEO) можуть використовувати частотні діапазони Ku та Ka. Для порівняння, більшість літаків літають на висотах не вище 14 км, що приблизно в десять разів нижче за висоту супутника на низькій навколоземній орбіті (LEO). Супутники на низькій навколоземній орбіті також рухаються по негеостаціонарних орбітах, що дозволяє їм використовувати більш гнучкі орбітальні траєкторії завдяки своїй здатності нахиляти свої орбітальні площини, забезпечуючи додаткові можливості покриття. Як згадувалося вище, супутник на низькій навколоземній орбіті (LEO) працює на відстані від 200 до 2000 км від поверхні Землі. Натомість традиційні супутники зв'язку розташовані набагато вище, на геостаціонарній орбіті, приблизно на висоті 36 500 км. Завдяки своїм меншим розмірам та меншій висоті, супутники на низькій навколоземній орбіті

спонукали до зміни мислення, наголошуючи на масштабованості, продуктивності та економічній ефективності. Експерти відзначають важливість швидкого розгортання, досягнення цілей місії та поповнення сузір'їв за потреби [5].

Супутниковий низькоорбітальний зв’язок використовують для:

Віддалених будівельних майданчиків де супутники LEO забезпечують високошвидкісне з’єднання без фізичної інфраструктури дозволяючи будівельним бригадам залишатися на зв’язку та продуктивно працювати; енергетики та гірничодобувних підприємств, які часто працюють в ізольованих регіонах із суворими умовами навколишнього середовища. Супутникове з’єднання LEO дозволяє цим об’єктам отримувати доступ до даних у режимі реального часу та хмарних додатків, покращуючи процес прийняття рішень та операційну ефективність; сільськогосподарських угідь де сучасне сільське господарство спирається на пристрої та датчики Інтернету речей для моніторингу стану врожаю та оптимізації зрошення. Супутники LEO забезпечують необхідне підключення для підтримки цих пристроїв, гарантуючи, що ферми у віддалених місцях можуть використовувати технології для збільшення врожайності та зниження витрат; офшорних платформ де нафтогазові платформи, розташовані далеко від суші, потребують надійного підключення для моніторингу безпеки, дистанційного управління та добробуту екіпажу. Супутникова технологія LEO забезпечує стабільний високошвидкісний Інтернет, який відповідає цим потребам.

1.2.3 Середньоорбітальний тип (MEO)

Супутники на середній навколоземній орбіті (MEO) працюють у діапазоні висот від 2000 до 35 786 кілометрів над Землею. Ця орбіта дозволяє супутникам пропонувати поєднання характеристик покриття, пропускної здатності та продуктивності, що знаходяться між близькістю та швидкою орбітою супутників на низькій навколоземній орбіті (LEO) та далекосяжним стаціонарним положенням геосупутників (GEO). Супутники MEO загальновідомі своєю значною роллю в глобальних навігаційних системах, найяскравішим прикладом якої є Глобальна

система позиціонування (GPS). Ці супутники утворюють сузір'я, яке надає послуги точного позиціонування, навігації та визначення часу користувачам у всьому світі. Розгортаючи кілька супутників у MEO, система GPS гарантує, що достатня кількість супутників буде видимою з будь-якого місця на Землі, що забезпечить точне позиціонування та навігацію. Унікальне положення MEO дозволяє їй обслуговувати широкий спектр застосувань, зокрема в навігації та зв'язку. Перевага використання таких орбіт порівняно з низькоосвітніми орбітами полягає в тому, що для безперервного глобального покриття потрібна менша кількість супутників, що знижує вартість сузір'я. Недоліком є те, що час передачі в обидва кінці (RTT або затримка) в MEO дещо вищий, ніж в LEO. RTT в LEO становить близько 5 мілісекунд, прикладом чого є сузір'я Iridium з певним значенням 5,2 мс. З іншого боку, мінімальний RTT в MEO становить 69 мс. Хоча ці цифри можуть здаватися значними, слід враховувати, що передача, що охоплює половину окружності земної кулі, вимагає щонайменше 67 мс по всій поверхні Землі, подібно до RTT в MEO, і забезпечує оптимальний голосовий зв'язок [6]. Основне призначення супутників MEO, зокрема тих, що використовуються в навігаційних системах, таких як GPS, полягає в передачі сигналів, які приймаються та обробляються наземними приймачами. Ці сигнали містять точну інформацію про час, що дозволяє користувачам розраховувати своє місцезнаходження з високим рівнем точності. GPS-приймачі тріангулюють сигнали від кількох супутників, що знаходяться в полі зору, щоб визначити їхнє місцезнаходження, швидкість та інформацію про час [7].

Зрозуміло, що супутники MEO знаходять баланс між затримкою та покриттям. Хоча вони можуть не досягти наднизьких рівнів затримки супутників LEO через більшу висоту над рівнем моря, супутники MEO помітно перевершують супутники GEO за показниками затримки та пропускної здатності, а також забезпечують стабільніше мережеве середовище, ніж численні системи передачі сигналу LEO. Супутники MEO пропонують достатньо високу швидкість передачі даних, щоб забезпечити роботу таких програм у режимі реального часу, як відеоконференції, VoIP та онлайн-співпраця. Порівняно з тисячами супутників, необхідних для стабільної роботи низької навколоземної орбіти (LEO), супутники

середньої навколоземної орбіти (MEO) пропонують набагато ефективніше покриття. Лише шість супутників у MEO забезпечують стабільне покриття практично для всієї земної кулі. Ця ширша зона покриття підвищує надійність мережі, мінімізуючи перебої в обслуговуванні та забезпечуючи стабільніше інтернет-з'єднання в більших географічних регіонах. Загалом, ризик перебоїв у роботі або збоїв із супутниками MEO значно менший порівняно з GEO та LEO. Це означає, що надійне з’єднання з надвисокою пропускною здатністю нарешті стало можливим для віддалених та недостатньо обслуговуваних районів.

Основне використання супутників MEO пов'язане з навігацією та відстеженням. Наприклад, системи навігації транспортних засобів значною мірою залежать від даних, що надаються цими супутниками, для забезпечення точного відстеження місцезнаходження в режимі реального часу. Це дозволяє ефективно планувати маршрути та керувати дорожнім рухом, значно покращуючи час подорожі та безпеку на дорогах. У морському секторі супутники середньої орбітальної зони (MEO) мають вирішальне значення для навігації суден. Вони дозволяють точно відстежувати місцезнаходження у світовому океані, допомагаючи в плануванні маршруту, щоб уникнути небезпечних зон та оптимізувати споживання палива. Супутники MEO також революціонізували сільськогосподарську галузь завдяки точному землеробству. Надаючи точні дані про місцезнаходження, фермери тепер можуть використовувати сільськогосподарську техніку на основі GPS для точного посіву насіння, внесення добрив та моніторингу стану врожаю, що значно підвищує врожайність та зменшує відходи. Детальна та точна інформація про місцезнаходження, отримана від супутників MEO, сприяє розвитку міст . Планувальники та забудовники використовують ці дані для картографування, землеміріння та розвитку інфраструктури, забезпечуючи ефективне використання простору та ресурсів у постійно зростаючих міських ландшафтах. Більше того, комунальні послуги та телекомунікаційний сектори покладаються на супутники MEO для управління інфраструктурою. Чи то моніторинг трубопроводів, чи розширення мережі, точні дані з цих супутників дозволяють ефективно планувати та обслуговувати,

забезпечуючи безперебійне обслуговування населення. Зрештою, супутники MEO відіграють ключову роль у моніторингу навколишнього середовища . Вони допомагають відстежувати зміни клімату, контролювати стихійні лиха та ефективніше управляти природними ресурсами. Ці дані в режимі реального часу є безцінними для прийняття обґрунтованих рішень щодо захисту нашого навколишнього середовища та сталого управління його ресурсами. Супутники MEO, завдяки широкому охопленню та зменшеній затримці сигналу, є незамінними в цих секторах. Від покращення навігації та сільського господарства до сприяння міському розвитку та збереженню навколишнього середовища, застосування супутників MEO є широким та важливим.

1.3 Види систем супутникового зв’язку

Системи супутникового зв'язку поділяються на типи: за орбітами супутників, призначенням та діапазонами частот. Основні типи включають системи супутникового телебачення та супутникового інтернету (наприклад, Starlink), які забезпечують передачу даних на великі відстані. Також існують системи супутникової телефонії (наприклад, Iridium, Thuraya) для мобільного зв'язку в будь-якій точці планети, а також системи супутникової навігації (наприклад, GPS), які надають точну інформацію про місцеположення користувача.

1.3.1 Система супутникового інтернету Starlink

Starlink - це система супутникового інтернету від компанії SpaceX, яка забезпечує високошвидкісний доступ до мережі в будь-якій точці планети за допомогою великої мережі низькоорбітальних супутників та спеціальних терміналів-антен. Цей сервіс розроблений для надання надійного зв'язку у віддалених та сільських районах, де традиційний доступ до інтернету обмежений або відсутній.



Рис.1.2 Система Starlink

Проєкт почали розробляти в 2015 році, тестові прототипи вивели на орбіту в лютому 2018 року, а першу групу із 60 супутників запустили у травні 2019-го. Зараз на орбіті вже майже дві тисячі супутників, а до 2027 року компанія планує запустити до космосу загалом 42 тисячі - тоді, яка стверджує компанія, платформа прокриє майже всю планету інтернетом. Орієнтовна вартість проєкту - 20-30 мільярдів доларів США [8].

Більшість супутникових інтернет-сервісів отримують сигнали від одного геостаціонарного супутника, що обертається на висоті близько 35 678 км над Землею. Вони працюють, пересилаючи інтернет-дані за допомогою радіосигналів через вакуум простору між трансляційною станцією, яка надсилає дані на супутник. Потім супутник передає їх назад на вашу приймальну антену. Відстань, яку мають подолати ці радіосигнали, означає значну затримку, що робить потокове відео складним або неможливим, особливо якщо у вас немає прямої видимості від вашої антени до супутника. Затримка зазвичай становить від 450 до 700 мілісекунд. Starlink працює інакше. Замість одного високоорбітального супутника він використовує мережу з тисяч менших супутників на низькій навколоземній орбіті (LEO), запущених SpaceX на висоту лише близько 550 км над планетою. Це зменшує час затримки до 25–60 мілісекунд, що дозволяє транслювати та грати онлайн без надокучливих затримок. Тисячі супутників пов’язані між собою, тому майже завжди у вашому полі зору має бути супутник, що зменшує ймовірність простоїв. Фазована антенна решітка дозволяє їй ефективно відстежувати

супутники, допомагаючи запобігти перебоям сигналу. Хоча вона розроблена для стійкості до екстремальних холодів і спеки, мокрого снігу, дощу та вітру, негода все одно може впливати на неї. Наприклад, важкі, особливо щільні, вологі грозові хмари можуть погіршити сигнал. Сильний вітер не повинен бути проблемою, за умови, що антена належним чином закріплена та встановлена. Взимку антена має функцію підігріву, яка запобігатиме утворенню льоду та розтоплюватиме сніг, але надзвичайно важкий сніг може вимагати ручного видалення.

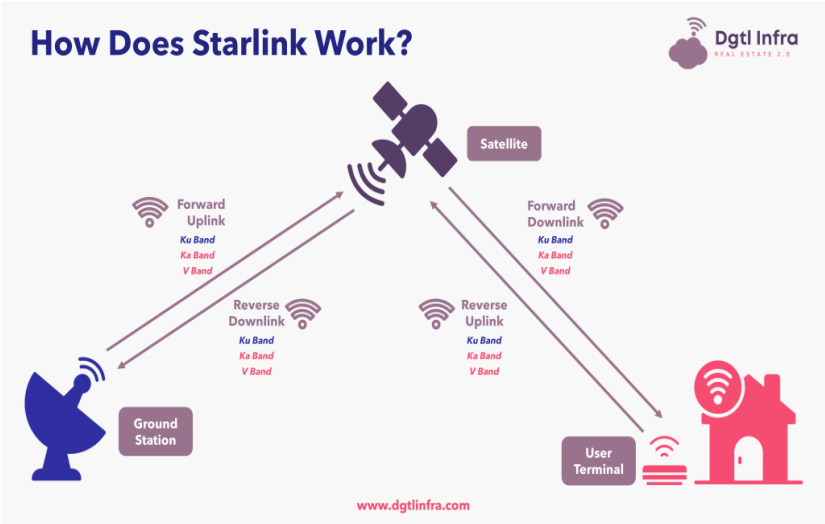


Рис.1.3 Приклад роботи системи Starlink

Чи впливає дощ на Starlink? Хоча легкий дощ не повинен створювати жодних проблем, сильна злива може погіршити якість сигналу, особливо через густі та щільні хмари, що супроводжують цей дощ. Чим більше вологи в повітрі, тим вища імовірність того, що радіосигнали, що передаються між супутниками, можуть бути заблоковані. З аналогічних причин це також може бути проблематично в густому тумані.

1.3.2 Система Inmarsat

INMARSAT (Інмарсат) — міжнародна компанія супутникового зв'язку, заснована в 1979 році, спочатку як міждержавна організація. Компанія управляє групою з одинадцяти геосинхронних телекомунікаційних супутників. Акції компанії котируються на лондонській біржі (ISAT). На початок 2023 року компанія перебуває в стадії злиття з американською компанією «Viasat» в рамках угоди вартістю у 5.4 млрд фунтів стерлінгів.

Послуги включають в себе як звичайний телефонний зв'язок, так і передачу даних, а також передачу сигналів лиха та сигналів європейської геостаціонарної служби навігаційного покриття EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) і аналогічної американської системи «WAAS». Зв'язок здійснюється за допомогою спеціальних цифрових радіопередавачів (терміналів). Сигнал передається на один із супутників і потім ретранслюється на наземну станцію. Таким чином забезпечується надійний зв'язок у віддалених районах.

Сьогодні Inmarsat використовує широкосмугову мережу, яка дозволяє транслювати дані зі швидкістю до 490 кб/с, забезпечує мобільний зв'язок та доставку факсимільних повідомлень. Така функціональність стає можливою завдяки використанню нових супутників геостаціонарного типу-I-4 (Інмарсат-4), перший з яких був запущений більше десяти років тому. Подальше доповнення угруповання супутників забезпечило розширення покриття системи зв'язку практично на всю територію земної кулі (до 82% поверхні планети – виняток становлять крайні полярні області Землі) [9].

Сам Inmarsat-4 - це супутник четвертого покоління для лондонського оператора глобального мобільного супутникового зв'язку Inmarsat. Розроблені приблизно в 100 разів потужніші за супутники сучасного покоління та забезпечуватимуть десятикратне збільшення комунікаційної ємності, ці супутники підтримуватимуть нову широкосмугову глобальну мережу (B-GAN), яка буде запроваджена у 2004 році для інтернет- та інтранет-рішень, відео на вимогу, відеоконференцій, факсу, електронної пошти, телефону та високошвидкісного доступу до локальної мережі. Два супутники були запущені у 2005 році, а третій залишався на землі як запасний до 2008 року, коли його також було запущено [10].

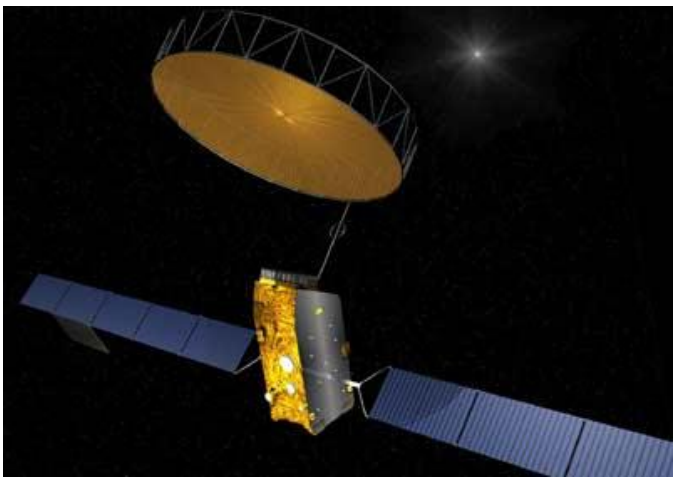


Рис.1.4 Inmarsat-4 (I-4)

1.3.3 Система Thuraya

Система Thuraya (Турая) – це мобільна супутникова система зв'язку, що забезпечує доступ до мобільного зв'язку та інтернету в регіоні, який охоплює понад 140 країн Європи, Азії, Близького Сходу та Африки. Вона складається з супутникового, наземного та абонентського сегментів, надаючи послуги через спеціалізовані супутникові телефони, IP-термінали, а також аксесуари, як-от чохли-супутникові адаптери для смартфонів. Цей оператор може працювати як у супутниковій мережі, так і в мережах GSM операторів із різних країн, з якими він має роумінгові угоди. Система використовує три геостаціонарні супутники, вона відрізняється високою якістю зв'язку. Також Турайя забезпечує високу швидкість передачі в інтернет мережі. Ця система зв'язку веде гнучку тарифну політику, що є ще однією її перевагою [11]. Thuraya є значним гравцем на світовому ринку супутникових телефонів, хоча їхня популярність залежить від сегменту ринку, оскільки вони пропонують пристрої, які конкурують на ринку суворих супутникових телефонів, таких як їхній XT-PRO, а також інші рішення для підключення. Супутникові телефони Thuraya працюють через геостаціонарний супутник (близько 36 000 км над Землею). Коли ви здійснюєте дзвінок, ваш голосовий сигнал передається від телефону до супутника, а потім до приймача на іншому кінці. Процес відбувається безперебійно. Супутникові телефони використовуються в надзвичайно важливих ситуаціях, таких як: віддалені польові

операції (такі як нафта і газ, гірничодобувна промисловість, логістика); морська навігація та зв’язок; подорожі та експедиції поза мережею; регування на надзвичайні ситуації та стихійні лиха. На відміну від смартфонів, більшість супутникових телефонів призначені переважно для голосового зв'язку та SMS-повідомлень у супутниковому режимі. Основні призначення супутникових телефонів - надійний зв'язок там, де інші телефони виходять з ладу.

Табл.1.2

Відмінності між смартфоном та супутниковим телефоном

	Смартфон	Супутниковий телефон
Підключення	Спирається на мережу наземних веж стільникового зв'язку.	Підключається до орбітальних супутників, які діють як «вежі стільникового зв'язку в небі».
Функціональність	«Кінотелефонний комп’ютер» із доступом до Інтернету, програмами, електронною поштою, відеодзвінками та соціальними мережами.	В основному для базового зв'язку (дзвінки та текстові повідомлення), деякі новіші моделі пропонують обмежений обсяг даних.
Охоплення	Обмежено районами з існуючою інфраструктурою стільникового зв'язку.	Може надавати послуги у віддалених місцях, горах, океанах та районах без веж стільникового зв'язку.

2 ВИКОРИСТАННЯ OFDM В СИСТЕМАХ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Модуляція OFDM широко використовується в сучасних системах передачі, що використовують телефонні лінії (різні типи DSL-модемів) або лінії електропередач (стандарт HomePlug) канали, а також у бездротовому зв'язку (стандарти 802.11a та 802.11g). Вона дуже стійка до міжсимвольних перешкод (ISI) та імпульсних спотворень у часовій області. Також імпульсні спотворення в частотній області (згасання каналу) можуть бути усунені в системах зі зворотним зв'язком шляхом виключення каналу. OFDM використовує для передачі даних багато ортогональних вузькосмугових каналів з повільною сигналізацією в кожному з них. Швидкість передачі залежить від розміру сузір'я QAM, що використовується в каналах, яке можна вибрати незалежно для кожного каналу.

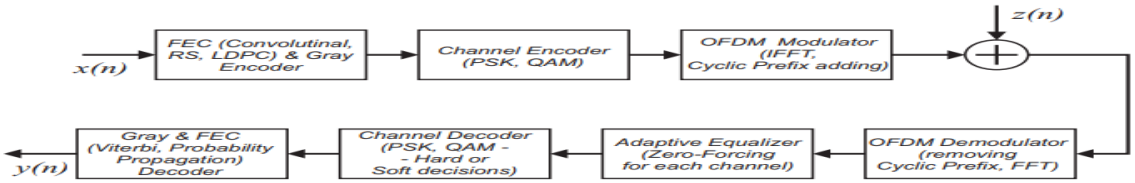


Рис.2.1 Проста блок-схема цифрової системи передачі з OFDM-модуляцією та прямою корекцією помилок

У практичних системах усі канали часто використовують одне й те саме сузір'я (пристрої 802.11). Циклічний префікс додається в часовій області до кожного OFDM-кадру після створення. Зазвичай це остання частина реального кадру, що повторюється знову перед його передачею. Якщо довжина циклічного префікса довша за довжину відповіді каналу, то ISI виключаються з демодульованого сигналу. Після кодування даних для кожного каналу OFDM-кадру створюється за допомогою IFFT, тому канали ортогональні в частотній області. Легко розрізнити сигнали каналу після операції FFT в демодуляторі. Шумовий сигнал та імпульсні спотворення усереднюються по всіх каналах. Більше інформації про OFDM та його моделювання можна знайти в (Izydorczyk and Kucharczyk 2003) та (Kucharczyk 2003). На рис.2.1 представлена проста діаграма OFDM-системи передачі. Усі блоки на цій діаграмі незалежні один від одного. Будь-який FEC-код може бути використаний для корекції помилок, але найчастіше

використовуються згорткові коди з декодером Вітербі. Можна використовувати м'який або жорсткий вхідний декодер. Використання коду Грея мінімізує кількість спотворених бітів та вимоги до FEC-коду. Після жорстких рішень на виході декодер Ріда-Соломона корисний – він дає ще один виграш кодування для системи ціною кращого BER є нижча швидкість усього коду.

Останніми роками в системах супутникового зв'язку все частіше застосовується OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним розділенням), оскільки ця технологія дозволяє підвищити пропускну здатність, спектральну ефективність та надійність зв'язку, що особливо важливо для високошвидкісного доступу в Інтернет, телевізійного мовлення та інших сервісів. Однак, існують виклики, пов'язані з адаптацією OFDM для супутникових систем, такі як значні доплерівські зсуви, широкі фазові шуми та затримки сигналу через велику відстань до супутника. Інтеграція супутників та наземних стільникових мереж є перспективною технологією для забезпечення глобального повсюдного зв'язку. Оскільки ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) було прийнято в стандартах 3GPP, таких як 4G LTE та поточний новий радіозв'язок 5G, важливою особливістю супутника стане досягнення високого ступеня спільності з наземними стільниковими мережами, тобто LTE або 5G. Для систем OFDM синхронізація має вирішальне значення для початкової обробки підключення. На відміну від традиційних наземних стільникових систем на основі OFDM, синхронізація в супутниках на основі OFDM стикається з новими викликами через більший доплерівський зсув у супутниковій системі. Останні технологічні тенденції вказують на зсув до більш гнучких та адаптивних систем зв'язку. Розробка програмно-визначених супутників та реконфігурованих корисних навантажень створила нові можливості для впровадження передових схем модуляції, таких як OFDM. Крім того, поява супутникових сузір'їв на низькій навколоземній орбіті (LEO) привнесла нову динаміку в екосистему супутникового зв'язку, що зробило необхідними методи модуляції, які можуть обробляти швидкі зміни в умовах каналу. Основні технічні цілі впровадження OFDM у супутниковому зв'язку включають підвищення спектральної ефективності для

максимізації пропускної здатності даних в межах обмеженого розподілу смуги пропускання, підвищення стійкості до погіршень каналів, характерних для супутникових ліній, зниження енергоспоживання для продовження терміну служби супутників та забезпечення сумісності з існуючими наземними стандартами на основі OFDM для сприяння безшовній інтеграції.

Конвергенція супутникових та наземних мереж, особливо в контексті 5G та подальших технологій, ставить ще одне критично важливе завдання: створення уніфікованих стандартів зв'язку, які можуть безперебійно працювати в різних сегментах мережі. Широке впровадження OFDM у наземних системах робить його сильним кандидатом для цього уніфікованого підходу, потенційно спрощуючи архітектуру мережі та зменшуючи витрати на впровадження.

2.1 Методи корекції помилок для надійності OFDM

Для підвищення надійності систем OFDM використовуються різні методи корекції помилок. До них належать кодування з прямою корекцією помилок (FEC), перемежування та вдосконалені схеми кодування, які допомагають відновити дані, пошкоджені під час передачі. Ці методи забезпечують стійкість до пошкоджень каналу, шуму та перешкод, значно покращуючи показники коефіцієнта помилок у бітах систем OFDM у складних бездротових середовищах.

Основними перевагами OFDM над традиційними одноканальними системами є його спектральна ефективність та несприйнятливість до ефектів багатопроменевості. Однак OFDM має кілька недоліків, одним з найсуттєвіших з яких є його відносно високе співвідношення пікової та середньої потужності (PAPR). Це неминучий наслідок використання швидкого перетворення Фур'є (FFT) з багатьма символами сузір'я частотної області в одній фазі. PAPR лінійно зростає зі збільшенням кількості піднесучих, а максимальне PAPR дорівнює кількості піднесучих. У сучасних системах може бути до 2048 піднесучих, що призводить до дуже сильного PAPR. Високі піки можуть створювати серйозні нелінійні спотворення в смузі, якщо їх подавати на підсилювач високої потужності (ПВП) на

передавачі, якщо ПВП не є високолінійним з великим відхиленням, а цифро-аналоговий перетворювач передавача також не має великого динамічного діапазону. Хоча це може бути можливо для потужних пристроїв, таких як базові приймально-передавальні станції, вони є занадто дорогими з точки зору споживання енергії для використання в мобільних пристроях, що робить високий PAPR серйозною проблемою для мобільних телефонів та інтернет-послуг. Значні дослідницькі зусилля були зосереджені на цій проблемі, і рішення поділяються приблизно на дві групи: запобігання та пом'якшення. Методи запобігання працюють на стороні передавача та спрямовані або на генерацію символів OFDM без спотворень, або на зменшення PAPR, але вводять інші типи спотворень. Приклади методів запобігання включають кодування, вибране відображення, часткові послідовності передачі, резервування тонів, розширення активного сузір'я та м'яке відсікання та фільтрацію. Методи пом'якшення працюють на стороні приймача та спрямовані на виправлення будь-яких спотворень, що виникають внаслідок високого PAPR або внаслідок методів запобігання [12].

Одним із найпростіших і найпопулярніших методів запобігання є м'яке відсікання, яке зменшує високі піки шляхом штучного обмеження максимальної амплітуди будь-якої вибірки часової області до заздалегідь визначеного порогу, перш ніж вона подається на підсилювач. Відсікання – це нелінійний процес, який вносить бітові помилки в приймачі важко передбачуваним чином. Основою методу корекції бітових помилок є генерація набору одночасних рівнянь з рівнянь швидкого перетворення Фур'є (FFT), приймаючи відсічені вибірки часової області як невідомі. Коли рівняння розв'язані, амплітуда вибірок часової області до відсікання знаходиться, тим самим ефективно змінюючи відсікання в приймачі.

Один із підходів, що використовуються для запобігання, полягає у генерації певної кількості символів OFDM з заданого бітового потоку та передачі лише того символу, PAPR якого нижче певного прийнятного порогу, до HPA. Цей метод вимагає додавання додаткової інформації, щоб приймач міг правильно декодувати символ, і тому швидкість передачі даних зменшується. Блокове кодування, часткові послідовності передачі та вибране відображення є прикладами методів генерації

символів з низьким PAPR. Для зменшення PAPR було запропоновано компандування з використанням компресора на передавачі та експандера на приймачі. Цей метод значно зменшує PAPR, але BER збільшується на приймачі в процесі розширення. Він також збільшує шум у сигналі. Цікаво, що в літературі для зменшення PAPR також використовуються такі методи кодування, як блокові коди, комплементарні послідовності Голея та коди Ріда-Мюллера другого порядку. Це говорить про можливість використання методів кодування для отримання як переваг, так і контролю помилок та зменшення PAPR. Наприклад, Вілкінсон та Джонс запропонували зменшення PAPR за допомогою простого коду непарної парності (SOPC), який базується на сигналі з чотирма несучими та блочним кодом зі швидкістю 3/4, продемонструвавши, що PAPR можна зменшити з 6,02 дБ до 2,48 дБ у випадку 4 бітів, 3 біти можна використовувати для передачі даних, а один - для перевірки непарної парності. Вілкінсон, Джонс та Тао та інші запропонували використовувати комплементарні послідовності Голея для досягнення зменшення PAPR, оскільки спектр потужності комплементарних послідовностей Голея приблизно плоский. Іншим методом, запропонованим для зменшення PAPR, є комплементарне блокове кодування (CBC). CBC - це код з можливостями виявлення та корекції. CBC може сприяти зменшенню PAPR у сигналі OFDM, оскільки він не генерує послідовності з усіма рівними бітами. У випадку великого розміру кадру можна використовувати субблочне комплементарне кодування (SBCC). У SBCC інформаційна послідовність розбивається на кілька підблоків однакового розміру, і кожен підблок кодується додатковим кодом корекції помилок.

2.1.1 Використання LDPS-кодів для корекції помилок OFDM

Теоретично створення коду з будь-якою бажаною довжиною кодового слова не є проблемою, але проблема виникає, коли потрібне декодування цього коду. Кожен додатковий біт у кодовому слові подвоює кількість станів у декодері Вітербі або подвоює кількість кодових слів для перевірки методом перерахування. В

результаті це робить декодування неможливим, оскільки витрати пам'яті або часу занадто високі. Нову ідею декодування представив Галлагер у своїй монографії (Галлагер, 1963) про коди з низькою щільністю перевірки парності (LDPC). Вона була названа декодуванням з поширенням ймовірності. Ці коди були забуті на деякий час і знову відкриті Маккеєм у 1995 році, описані як дуже хороші коригувальні коди. Метод декодування, відкритий Галлагером, раніше був описаний там з точки зору алгоритму суми-добутку на основі фактор-графів.

Корекційні можливості будь-якого коду залежать від швидкості кодування та довжини коду. Якщо використовуються блокові коди, вона дорівнює довжині кодового слова. У згорткових кодах основним параметром є довжина пам'яті (порядок пам'яті) в кодері. Виходячи з теорії Шеннона, можна помітити, що в цифровій системі передачі будь-яка бажана ймовірність помилки бути досягнута, якщо довжина кодового слова є достатньо довгою (у згорткових кодах: довжина пам'яті):

$$P_e \leq 2^{-nf(R)} \tag{1.1}$$

де n – довжина кодового слова, а f(R) – функція, що визначається характеристиками каналу та залежить від швидкості передачі даних R, причому R менше за пропускну здатність каналу. Теоретично не є проблемою створити код з будь-якою бажаною довжиною кодового слова, але проблема виникає, коли потрібне декодування цього коду. Кожен додатковий біт у кодовому слові подвоює кількість станів у декодері Вітербі або подвоює кількість кодових слів для перевірки методом перерахування. В результаті це робить декодування неможливим через занадто високий обсяг пам'яті або витрати часу.

У супутниковому зв'язку на сигнали можуть впливати атмосферні згасання, перешкоди та шум, що призводить до помилок передачі. Коди LDPC мають чудову ефективність корекції помилок, що дозволяє ефективно виявляти та виправляти помилки під час передачі, тим самим підвищуючи надійність систем зв'язку. Зв'язок обмежень між контрольними вузлами та змінними вузлами кодів LDPC можна представити за допомогою моделі факторного графа на рисунку 2.2. Модель

факторного графа LDPC в основному включає змінні вузли (VN), контрольні вузли (CN), матрицю перевірки парності та додаткову інформацію, що з'єднує змінні вузли та контрольні вузли.

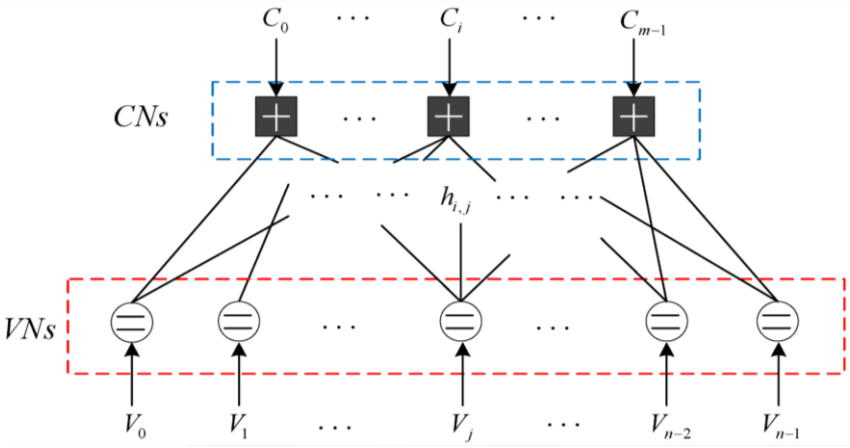


Рис.2.2 Модель факторного графа LDPC

2.1.2 Turbo-коди

Турбо-код — паралельний, каскадний, блоковий, систематичний код, який здатен виправляти помилки, що виникають при передачі цифрової інформації каналом зв'язку з шумами. Синонімом турбо-коду є відомий в теорії кодування термін — каскадний код (англ. concatenated code) (запропонований Д. Форні в 1966 році) [13]. Також Turbo-коди — це клас ітераційних помилкокоригуючих кодів, розроблений у 1993 році (Berrou, Glavieux, Thitimajshima). Вони стали проривом у цифровому зв’язку, бо вперше дозволили наблизити ефективність передачі до межі Шеннона — теоретичного максимуму ефективності кодування. Turbo-коди, вперше представлені в 1993 році, є високопродуктивними кодами прямої корекції помилок (FEC), і вони використовуються в різних сучасних бездротових додатках, включаючи супутникові та стаціонарні бездротові системи. Турбокоди використовують ітеративний алгоритм декодування, який максимально наближається до пропускної здатності каналу, але це збільшує обчислювальну складність і затримку [14]. Ці паралельні каскадовані згорткові коди з ітеративним декодуванням досягли безпрецедентної продуктивності при виправленні помилок, спочатку зустрівши скептицизм, перш ніж отримати широке визнання в телекомунікаційних стандартах [15].

Конвергенція цих технологій являє собою критичну еволюцію в бездротовому зв'язку. OFDM вирішує проблеми багатопроменевих згасань та міжсимвольних перешкод, розділяючи канал на кілька ортогональних піднесучих, тоді як турбокодування забезпечує надійні можливості корекції помилок, необхідні для підтримки цілісності сигналу в складних умовах. Сучасні технологічні тенденції вказують на зростаючий попит на вищі швидкості передачі даних, покращену спектральну ефективність та підвищену надійність бездротового зв'язку. Інтеграція передових методів турбокодування з системами OFDM спрямована на оптимізацію продуктивності в мережах наступного покоління, особливо в 5G та далі, де вимоги до низької затримки та високої надійності є першочерговими.

Основні цілі вдосконалення OFDM за допомогою методів турбокодування включають: покращення показників коефіцієнта бітових помилок (BER) за різних умов каналу; збільшення пропускної здатності системи без додаткових вимог до пропускної здатності; зменшення обчислювальної складності при збереженні підвищення продуктивності; та розробку адаптивних схем кодування, які динамічно реагують на зміну характеристик каналу.

Цілі дослідження поширюються на оптимізацію конструкції перемежувача в турбокодованих OFDM системах, оскільки структура перемежувача суттєво впливає на можливості корекції помилок. Крім того, основна увага приділяється розробці ефективних алгоритмів декодування, які балансують продуктивність зі складністю реалізації, особливо для пристроїв з обмеженими ресурсами.

Траєкторія еволюції передбачає рух до більш складних гібридних систем, які поєднують турбокодування з іншими передовими методами, такими як MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) та адаптивна модуляція. Ці інтегровані підходи спрямовані на розширення меж можливого в продуктивності бездротового зв'язку, задовольняючи експоненціально зростаючий попит на дані в сучасних цифрових екосистемах.

Поточні проблеми інтеграції OFDM-Turbo включають високу складність, особливо в приймачі, та необхідність складних алгоритмів для адаптації до змінних

у часі та шумних каналів, таких як канали з багатопроменевим поширенням та доплерівським зсувом. Інші проблеми включають надлишковість даних та складність роботи з високими коефіцієнтами пікової та середньої потужності (PAPR) у системах, таких як ACO-OFDM.

Паралельні каскадовані коди, як їх також називають, можуть бути реалізовані за допомогою блокових кодів або згорткових кодів. Згортковий код виник в результаті поєднання трьох ідей, відомих усім у спільноті кодерів. Перетворення загальновживаних несистематичних згорткових кодів на систематичні коди. Використання м'якого входу та м'якого виходу. Замість використання жорстких рішень, декодер використовує ймовірності отриманих даних для генерації м'якого виходу, який також містить інформацію про ступінь достовірності вихідних бітів. Це досягається за допомогою перемежувача. Кодери та декодер працюють на перестановках. Ітеративний алгоритм декодування, зосереджений навколо двох останніх концепцій, удосконалював би свій вихідний сигнал з кожним проходом, таким чином нагадуючи турбодвигун, що використовується в літаках. Звідси й назва "турбо" була використана для позначення цього процесу.

Поєднання турбокодів з системами OFDM забезпечує значні переваги, включаючи надійну продуктивність у багатопроменевих середовищах, низьку необхідну енергію передачі та можливість досягнення високої спектральної ефективності. Ітеративне декодування турбокодів забезпечує кращу продуктивність у каналах з високою частотною та часовою вибірковістю та може поєднуватися з такими методами, як адаптивна модуляція, для збільшення пропускної здатності системи, зберігаючи при цьому низький рівень помилок у бітах.

Основними недоліками використання турбокодів у OFDM-системах є висока складність декодування та затримка, що ускладнює їх реалізацію в застосунках реального часу та призводить до високого рівня помилок при дуже низьких коефіцієнтах помилок у бітах ($\approx 10^{-6}$). Крім того, вони можуть бути не такими ефективними для високошвидкісної потокової передачі даних, а продуктивність системи може значно погіршитися в перевантажених сценаріях MIMO-OFDM.

2.1.3 Коди Ріда-Соломона (RS)

Коди Ріда-Соломона (RS) – це потужний тип циклічних кодів для виправлення помилок, що працюють з групами бітів (наприклад, байтами), а не окремими бітами. Вони широко використовуються для корекції помилок у таких системах, як компакт-диски, системи архівів із можливістю відновлення, а також в системах завадостійкого кодування.

Коди Ріда-Соломона були розроблені в 1960 році Ірвінгом С. Рідом та Гюставом Соломоном, які на той час були співробітниками Лабораторії Лінкольна Массачусетського технологічного інституту. Їхня основоположна стаття мала назву «Поліноміальні коди над певними скінченними полями». Оригінальна схема кодування, описана в статті Ріда та Соломона, використовувала змінний поліном на основі повідомлення, що кодується, де кодеру та декодеру відомий лише фіксований набір значень (точок оцінки), що кодуються.

Код Ріда-Соломона визначається як RS(n, k) з s бітовими символами. Це означає, що кодер приймає k символів даних по s бітів кожен і додає символи парності, щоб створити кодове слово n символів. Таким чином, є n – k символів парності по s бітів кожен [16].

Коди Ріда-Соломона (RS) працюють шляхом поділу даних на блоки «символів» (групи бітів) та додавання надлишкових «контрольних символів» для створення кодового слова. Ці контрольні символи обчислюються за допомогою математики скінченного поля та дозволяють декодеру виявляти та виправляти помилки, по суті, переоцінюючи вихідні дані за допомогою поліноміальної інтерполяції, навіть коли деякі символи пошкоджені або втрачені. Кількість виправних помилок залежить від того, скільки контрольних символів додано, причому код, заданий як RS(n, k), здатний виправити до t=(n-k)/2 помилок символів.

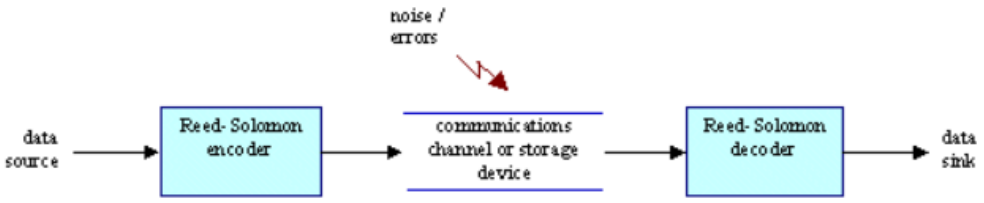


Рис.2.3 Типова схема коду Ріда-Соломона

Коди Ріда-Соломона (RS) є важливим підкласом недвійкових кодів BCH. RS-коди мають справжню мінімальну відстань, яка є максимально можливою для лінійного (n, k) коду, як у рівнянні:

$$d = n - k + 1 \quad (2)$$

Для декодування RS-кодів можна використовувати як метод Петерсона, так і алгоритм Берлекампа/Мессі. Останній також відомий як алгоритм синтезу FSR, оскільки він еквівалентний генерації коефіцієнтів певного LFSR. Інший метод декодування RS-кодів називається декодуванням перетворення, який використовує аналог перетворення Фур'є зі скінченним полем .

Особливо важливою здатністю RS-кодів (і недвійкових BCH-кодів загалом) є їхня здатність виконувати декодування помилок та стирань. Це має значення, якщо приймач може за певних обставин сигналізувати про втрату прийнятої цифри. Якщо такий код має відстань d, він може виправляти комбінації з l помилок та s стирань за умови, що $21+ s < d$ [17].

Хоча RS-коди природно підходять для недвійкових цифр, їх іноді можна дуже ефективно використовувати для двійкових каналів, обробляючи групи з m бітів як 2-арні розряди. Було показано, що такі коди перевершують двійкові коди з такою ж швидкістю та довжиною блоку при низьких коефіцієнтах помилок на виході. Крім того, при такому використанні RS-коди мають природну здатність до корекції пакетних помилок, оскільки, наприклад, пакет до m бітових помилок вплине щонайбільше на 2 «розряди».

Коди Ріда-Соломона пропонують значні переваги, насамперед їхню здатність виправляти «пакетні помилки», коли пошкоджено кілька послідовних бітів. Це

робить їх дуже ефективними для цілісності даних у системах зберігання даних, таких як компакт-диски та QR-коди, а також у мережах зв'язку, використовуючи надлишкові дані для реконструкції пошкоджених частин повідомлення. Вони також забезпечують значний «коефіцієнт кодування», що може зменшити необхідну потужність передачі для досягнення цільового рівня помилок.

Ключові переваги кодів Ріда-Соломона:

Корекція пакетних помилок: Вони чудово справляються з корекцією помилок, що виникають пакетно, що є поширеним явищем на фізичних носіях, таких як оптичні диски, або через перешкоди в каналі зв'язку. На відміну від кодів, які виправляють однобітні помилки, коди Ріда-Соломона можуть виправляти кілька символів (груп бітів) в одному блоці.

Висока надійність: Вони значно підвищують надійність даних, виявляючи та виправляючи помилки, гарантуючи, що отримані дані відповідають вихідним даним, що має вирішальне значення для цілісності даних.

Посилення кодування: Додаючи надмірність, коди Ріда-Соломона дозволяють системі зв'язку досягти цільового коефіцієнта бітових помилок з меншою потужністю передачі, заощаджуючи енергію та кошти.

Гнучкість: Коди є дуже гнучкими та можуть бути параметризовані для широкого кола застосувань, від цифрового зберігання до обробки мультимедіа.

Ефективність: Вони є потужним та ефективним класом кодів, особливо ефективними для виправлення кількох помилок у блоці даних.

Основними недоліками кодів Ріда-Соломона є їхня висока обчислювальна складність, значні накладні витрати на символи парності та обмежені можливості виправлення помилок для дуже високих коефіцієнтів помилок або великих пакетних помилок. Крім того, їх реалізація вимагає складної арифметики скінченного поля, і вони не можуть адаптуватися до змінних умов під час передачі без попередньо налаштованих параметрів.

Процеси кодування та декодування включають складні математичні операції в межах скінченних полів, що вимагають значних обчислювальних ресурсів.

Арифметика скінченних полів може бути складною та ресурсомісткою для реалізації. Накладні витрати

Коди Ріда-Соломона додають додаткові символи парності до вихідного повідомлення, що збільшує загальний обсяг даних, які необхідно передати або зберегти. Ці накладні витрати можуть знизити ефективність, а в деяких сценаріях потреба у фіксованій довжині блоку змушує використовувати додаткову надмірність для підтримки надійності.

Хоча вони ефективні для пакетних помилок, вони можуть дати збій, якщо кількість послідовних помилок перевищує можливості корекції коду, які визначають параметри коду. Вони чутливі до коефіцієнтів помилок, що перевищують певний поріг, і не можуть адаптуватися в середині передачі до несподівано великої кількості помилок. Фіксована довжина блоку: необхідність попередньо визначити довжину блоку та кількість бітів парності означає, що система не може адаптуватися до змінних умов мережі.

Потенціал для хибнопозитивних результатів: Хоча це трапляється рідко, існує ймовірність того, що декодер видасть неправильний результат без виявлення помилки.

2.1.4. Згорткові коди (Convolutional Codes)

Згорткові коди — це клас помилкокоригуючих кодів, у яких вихідні біти залежать не лише від поточного вхідного біта, а й від певної кількості попередніх бітів (пам’яті). Кодування виконується за допомогою зсувних регістрів та генерувальних поліномів.

Згорткові коди працюють шляхом обробки безперервного потоку вхідних бітів через серію регістрів зсуву, де вихідний код є функцією поточного вхідного сигналу та ряду попередніх вхідних даних. Вони створюються шляхом згортки вхідного потоку даних з набором генераторних поліномів, що створює потік вихідних бітів, що містить надлишковість для виявлення та виправлення помилок.

Вихідний код генерується за допомогою логічних схем, таких як вентилі XOR, які виконують лінійні комбінації бітів, що зберігаються в регістрах зсуву.

Приклад згорткового коду:

```
Input ---> [shift registers] ---> XOR ---> Output1
                                    |
                                    ---> XOR ---> Output2
```

Згорткові коди часто описуються як безперервні. Однак, можна також сказати, що згорткові коди мають довільну довжину блоку, а не є безперервними, оскільки більшість реального згорткового кодування виконується на блоках даних. Згортково-кодовані блокові коди зазвичай використовують завершення. Довільну довжину блоку згорткових кодів також можна порівняти з класичними блоковими кодами, які зазвичай мають фіксовані довжини блоків, що визначаються алгебраїчними властивостями [18].

Згорткове кодування даних здійснюється за допомогою регістра зсуву та пов'язаної з ним комбінаторної логіки, яка виконує додавання за модулем два. Згорткові коди не мають заздалегідь визначеної довжини слова, як блокові коди [19]. Ці коди вставляються в структуру кадру шляхом періодичного усічення. Нульові біти додаються до повідомлення для очищення регістрів зсуву. Швидкість кодування може впасти нижче k/n через додані до нього біти, які не несуть жодної інформації. Для стабілізації швидкості кодування потрібен великий період усічення. Для опису кодера потрібен набір з m векторів з'єднань, що мають таку ж розмірність, як і K (регістри зсуву).

Згорткові коди використовуються в системах OFDM для покращення продуктивності корекції помилок шляхом додавання надмірності до потоку даних перед модуляцією, що допомагає пом'якшити вплив шуму та згасання. Вони також використовуються для зменшення коефіцієнта пікової до середньої потужності (PAPR) сигналів OFDM та для протидії пакетним помилкам шляхом перемежування з даними на різних піднесуючих.

При додаванні надмірності згорткові кодери додають надлишкові біти до вихідного потоку даних. Ця надмірність є критично важливою для виправлення помилок у приймачі.

Для виявлення та виправлення помилок приймач використовує декодер, такий як алгоритм Вітербі, для декодування прийнятого сигналу та виправлення помилок, що виникли під час передачі, покращуючи коефіцієнт символьних помилок (SER) та коефіцієнт бітових помилок (BER).

При виправленні пакетних помилок OFDM чутливий до частотно-селективного згасання, яке може спричиняти пакетні помилки (послідовні бітові помилки) на одній або кількох піднесуючих. Згорткові коди в поєднанні з перемежуванням можуть розподілити ці пакетні помилки на більш випадкові помилки по всьому потоці даних, що полегшує їх виправлення декодером.

В кодуванні вихідний потік даних спочатку згорткове кодується, а потім модулюється на піднесучі OFDM.

При декодуванні у приймачі отриманий сигнал демодулюється, а потім декодується за допомогою відповідного алгоритму (наприклад, алгоритму Вітербі) для отримання вихідного потоку даних.

Згорткові коди мають перевагу завдяки своїй здатності обробляти безперервні потоки даних, особливо в таких застосуваннях, як далекий космос та супутниковий зв'язок, де вони є більш енергоефективними, ніж блокові коди. Вони мають пам'ять, що допомагає їм захищатися від пакетних помилок, і можуть використовувати ефективне декодування з м'яким прийняттям рішень, таке як алгоритм Вітербі. Їхня низька затримка декодування робить їх придатними для таких застосувань, як наднадійний зв'язок з малою затримкою (URLLC).

Ключові переваги згорткових кодів:

Пам'ять та виправлення помилок: На відміну від блокових кодів без пам'яті, згорткові коди мають пам'ять, що дозволяє їм виправляти складніші помилки, зокрема пакетні помилки, які виникають у безперервному потоці.

Ефективність для великих потоків даних: Вони є більш енергоефективними для дуже великих потоків даних порівняно з блоковими кодами.

Декодування з м'яким рішенням: Згорткові коди можна декодувати за допомогою методів м'якого рішення, таких як алгоритм Вітербі, який є ефективнішим, ніж декодування з жорстким рішенням, і покращує продуктивність.

Низька затримка: Процес декодування має низьку затримку порівняно з ітеративними методами декодування, що робить їх хорошим вибором для систем зі суворими вимогами до затримки, таких як URLLC.

Висока продуктивність: Вони можуть досягати майже оптимальної продуктивності, особливо при використанні в конкатенації з іншими кодами, такими як код Ріда-Соломона, і можуть наблизитися до межі Шеннона.

Висока швидкість передачі даних: Для заданого рівня потужності згорткові коди можуть забезпечити вищу швидкість передачі даних або зниження потужності, зберігаючи ту саму швидкість передачі даних.

Широка підтримка: Згорткові коди використовуються десятиліттями та добре вивчені, що призводить до широкої підтримки в багатьох системах зв'язку.

Недоліком згорткових кодів є те, що вони зазвичай демонструють гіршу ефективність корекції помилок порівняно з турбокодами, особливо за високих рівнів співвідношення сигнал/шум. Вони більш схильні до пакетних помилок та згасань, що вимагає додаткових методів виявлення помилок або перемежування для зменшення їхнього впливу.

2.1.5 BCH-коди (Bose–Chaudhuri–Hocquenghem)

BCH-коди (Bose–Chaudhuri–Hocquenghem) — це клас циклічних багаточленних блокових кодів, які забезпечують гарантоване виправлення декількох помилок у блоці фіксованої довжини. Особливістю BCH-кодів, є те що вони конструктивні, це означає, що можна побудувати код із наперед заданою здатністю виправляти t помилок, вибравши відповідний породжувальний поліном над GF(2^m).

BCH-коди використовують породжувальний поліном g(x), який формується як НСК (найменший спільний кратний) певних мінімальних поліномів у GF(2^m).

Коди BCH працюють за допомогою циклічних поліномів над скінченними полями для виявлення та виправлення кількох випадкових помилок у системах цифрового зв'язку. Їхній принцип базується на побудові генераторного полінома, який гарантує виправлення до вибраної кількості бітових помилок, з подальшим алгебраїчним декодуванням за допомогою синдромів.

Перевагою кодів BCH є легкість їх декодування, а саме за допомогою алгебраїчного методу, відомого як синдромне декодування. Це спрощує конструкцію декодера для цих кодів, використовуючи невелике малопотужне електронне обладнання.

Недоліки BCH-кодів в тому, що алгоритми (наприклад, Берлекемпа–Мессі, алгоритм Пітерсона) вимагають складних операцій над скінченними полями. Це ускладнює апаратну та програмну реалізацію, особливо для великих параметрів коду. При збільшенні кількості коригованих помилок різко зростає кількість операцій. Це робить BCH менш придатними для систем реального часу з обмеженими ресурсами. Для досягнення здатності виправляти кілька помилок потрібно додавати значну кількість контрольних бітів, це зменшує корисну пропускну здатність каналу.

При обмеженні довжини кодових слів довжина коду BCH завжди має вигляд, що не завжди зручно для практичних застосувань, це може вимагати додаткового скорочення або доповнення кодових слів.

У багатьох сучасних системах BCH-коди поступаються LDPC та Turbo-кодам, які забезпечують кращу продуктивність при близьких до межі Шеннона швидкостях.

2.1.6 Комбіноване кодування (Concatenated Coding)

Комбіноване кодування (Concatenated Coding) — це метод побудови кодів корекції помилок, у якому два або більше коди поєднуються послідовно: вихід одного коду стає вхідним для іншого. Такий підхід дозволяє отримати дуже сильні корекційні властивості при відносно низькій складності реалізації. Це один із ключових методів у супутниковому зв’язку, стандарті DVB-S, DVB-S2, CCSDS, глибокому космосі та мобільних мережах.

Принцип роботи Комбінованого кодування (Concatenated Coding) полягає в тому, що дані проходять через два (або більше) різних кодів корекції помилок послідовно, де кожен код виконує свою частину роботи і компенсує слабкі сторони іншого.

Комбіноване кодування складається з:

Зовнішнього коду (outer code) — зазвичай потужного, але зі складним декодуванням (наприклад, Reed–Solomon, BCH).

Внутрішнього коду (inner code) — простішого, але дуже ефективного при слабкому SNR (наприклад, згорткового, LDPC, Turbo).

Дані проходять кодування двічі, а декодуються у зворотному порядку.

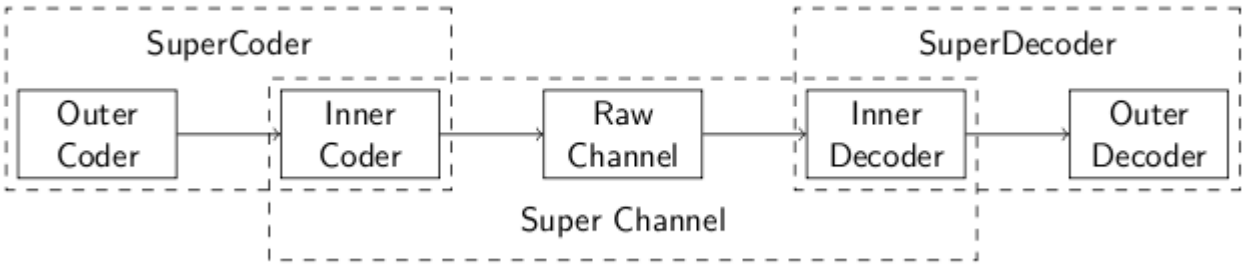


Рис. 2.4 Схематичне зображення об'єднаного коду, побудованого на внутрішньому та зовнішньому кодах

Нехай Cin буде кодом [n , k , d], тобто блоковим кодом довжини n, розмірністю k, мінімальної відстані Хемінга d та швидкості r = k / n, над алфавітом A:

$$C_{in} : A^k \rightarrow A^n \quad (3)$$

Нехай Cout— це код [N , K , D] над алфавітом B з B = A ^{k} символами:

$$C_{out} : B^K \rightarrow B^N \quad (4)$$

Внутрішній код Cin приймає один з A^k = B можливих вхідних даних, кодує в n -кортеж над A, передає та декодує в один з B можливих виходних даних. Ми розглядаємо це як суперканал, який може передавати один символ з алфавіту B.

Кодування виконується шляхом попереднього пропускання даних у блочному форматі через RS-кодер, а потім через згортковий кодер. До кінця кожного пакету додається один хвостовий байт 0x00. Цей хвостовий байт додається після рандомізації. У RS-кодері надлишкові біти надсилаються перед вхідними бітами, залишаючи хвостовий байт 0x00 в кінці розподілу. Нульові біти не рандомізуються. Зауважте, що така ситуація може виникнути лише в субканалізації. У цьому випадку RS-кодування не використовується.

Таблиця 2.1

Обов'язкові кодування каналів

Модуляція	Розмір некодованого блоку (байти)	Розмір закодованого блоку (байти)	Загальна швидкість кодування	RS-код	CC-код
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

У таблиці 2.1 наведено розміри блоків та швидкості кодування для різних модуляцій та швидкостей кодування. Оскільки 64-QAM є необов'язковою для діапазонів, що не потребують ліцензування, ці коди реалізуються лише за умови реалізації цієї опції.

Коли в UL застосовується субканалізація, FEC повинен обходити RS-кодер і використовувати загальну швидкість кодування, зазначену в таблиці 3, як швидкість кодування CC. Розмір некодованого блоку та розмір кодованого блоку можна обчислити шляхом множення значень, наведених у таблиці 3, на кількість виділених субканалів, поділену на 16. У випадку модуляції BPSK, RS-кодер слід обходити.

Об'єднане кодування забезпечує спосіб досягнення дуже високої надійності з меншою складністю шляхом поєднання двох або більше кодів, що призводить до відмінної продуктивності корекції помилок та високої пропускної здатності. Це забезпечує більшу гнучкість у проектуванні систем та створює ієрархічну структуру корекції помилок, що підвищує загальну відмовостійкість.

Ключові переваги конкатенованого кодування:

Висока продуктивність корекції помилок: завдяки об'єднанню кодів можна значно покращити продуктивність та досягти дуже низької ймовірності помилок, навіть за помірних умов каналу.

Менша складність декодування дозволяє використовувати коротші коди з меншою складністю декодування для внутрішньої та зовнішньої частин системи, що є більш керованим у практичних застосуваннях порівняно з одним дуже довгим кодом.

Підвищена відмовостійкість у квантових обчисленнях створює ієрархічну структуру, яка посилює можливості корекції помилок на кількох рівнях, підвищуючи загальну відмовостійкість системи.

Покращена пропускна здатність: Конкатеноване кодування може забезпечити високу пропускну здатність, що робить його ефективним для передачі даних.

Гнучкість та модульність: Структура конкатенованих кодів забезпечує більшу гнучкість і може бути використана для створення модульних конструкцій з шарами абстракції.

Підвищена продуктивність з певними типами каналів може покращити продуктивність на різних типах каналів, включаючи канали з пакетними помилками, іноді спрощуючи аналіз продуктивності без чергування.

Основними недоліками комбінованого кодування є підвищена надмірність, висока затримка через велику довжину кадрів та додаткова складність декодування, особливо при використанні внутрішніх декодерів з жорстким прийняттям рішень. Хоча вони ефективні, вони вимагають ретельного вибору параметрів для балансування продуктивності, складності та вимог до реалізації.

Процес використання двох окремих кодів (внутрішнього та зовнішнього коду) по суті збільшує загальний обсяг даних, що надсилаються, що називається надмірністю.

Деякі об'єднані коди, особливо послідовні об'єднані коди, можуть мати дуже довгі затримки декодування через необхідність великої довжини вхідних кадрів, що робить їх непридатними для застосувань, яким потрібна низька затримка.

Процес декодування є складнішим, ніж у випадку з окремими кодами. Якщо внутрішній декодер надає лише вихідні дані з жорстким рішенням, це перешкоджає зовнішньому декодеру повноцінно використовувати м'яку інформацію, що потенційно може призвести до неоптимальної продуктивності.

Використання внутрішнього декодера з жорстким рішенням обмежує потенційні переваги зовнішнього коду. Використання алгоритму Вітербі з м'яким виходом може надати м'яку інформацію, але це додає складності та може бути не таким оптимальним, як символьний підхід.

Деякі об'єднані коди можуть мати низьку продуктивність, навіть якщо їх можливо реалізувати на високих швидкостях, і вимагають ретельної оцінки для конкретного застосування.

Існує складний компроміс між коефіцієнтом посилення кодування, загальною швидкістю кодування та складністю кодека. Вибір правильної комбінації внутрішнього та зовнішнього кодів має вирішальне значення для досягнення бажаної продуктивності.

2.1.7 Інтерлівери (Interleaving)

Інтерлівери (Interleaving) — це техніка, яка використовується в системах цифрового зв’язку (включаючи супутниковий, OFDM, мобільний зв’язок, Wi-Fi), щоб зробити помилки каналу менш шкідливими для декодера. Інтерлівер переставляє (перемішує) послідовність бітів або символів перед передаванням так, щоб згустки помилок (burst errors), які виникають через завади чи федінг, а також перетворювались у поодинокі помилки, розсіяні по всьому пакету. Це значно полегшує роботу коректорів помилок (RS, BCH, LDPC, Convolutional тощо). У реальних каналах (особливо супутникових, радіоканалах та OFDM) помилки часто виникають не рівномірно, а "пачками": імпульсні шуми, згасання сигналу, перешкоди, колізії, втрати піднесучих OFDM. Коди типу Reed–Solomon, BCH, Convolutional мають обмеження щодо максимальної довжини помилки, яку вони можуть виправити. Інтерлівер розбиває пачкові помилки на одиничні, що різко підвищує їх ефективність.

Інтерлівери в системі OFDM змінюють порядок символів даних, щоб розбити пакетні помилки, що полегшує їх виправлення кодами корекції помилок. Процес включає в себе взяття блоку символів, їх переупорядкування відповідно до певного правила (часто в матрицю), а потім передачу їх в іншому порядку, зазвичай стовпець за стовпцем. Приймач використовує те саме правило у зворотному порядку для деперемежування та відновлення початкового порядку символів. По суті, більшість методів кодування з корекцією помилок добре пригнічують побітові помилки, які є незалежними та випадковими. Однак, коли канали не є безпам'ятними, можуть виникати пакетні помилки, тобто кілька бітових помилок, ймовірно, з'являться поруч, якщо виникне перша бітова помилка. Отже, в таких випадках типові коди корекції помилок стають набагато слабкішими [20].

OFDM використовує концепцію зв'язку на основі піднесучих, де піднесучі ортогональні одна до одної протягом періоду вибірки. Це можливо, коли несучі гармонічно збігаються одна з одною. У цій системі кожна з піднесучих передає частину повідомлення, і разом вони передають все повідомлення. Взаємна

ортогональність піднесучих допомагає досягти чудової продуктивності OFDM. 64-qam використовується для найвищої швидкості передачі даних. Зазвичай, перемежувач використовується перед операцією IFFT. Для кращої продуктивності системи перемежувач використовується до та після операції IFFT. Перемежувач означає, що він переставляє порядок послідовності, а деперемежувач відновлює той самий порядок. Отже, цей перемежувач зменшить коефіцієнт помилок у системі та покращить продуктивність системи.

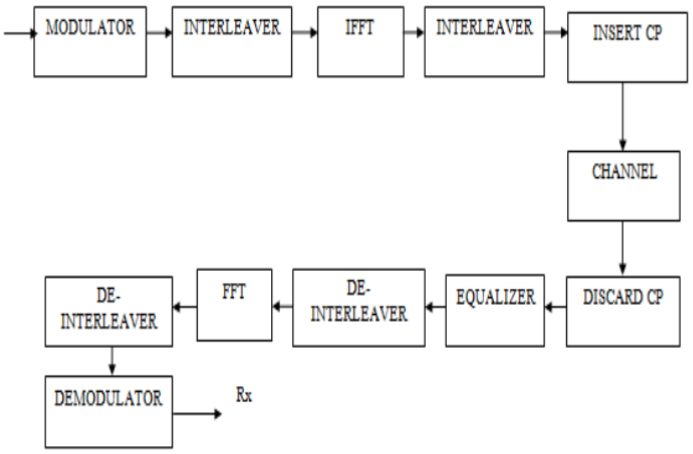


Рис.2.5 Система OFDM з інтерлівером

На рис. 2.5 показано використану систему OFDM. Багатоканальна модуляція – це метод передачі даних шляхом розділення їх на кілька даних та передачі кожного з цих компонентів через окремі несучі сигнали. Після модуляції перемежувач використовується для перемежування потоків даних, модульованих QAM. Перемежувач означає, що він переставляє порядок послідовності, а деперемежувач відновлює той самий порядок [21].

При перетворенні пакетних помилок безпроводові та інші канали зв'язку можуть призводити до пакетних помилок, коли кілька бітів пошкоджені в тісній послідовності. Оскільки коди корекції помилок менш ефективні проти пакетних помилок, перемежування розподіляє ці помилки з часом та частотою.

Для переупорядкування символів послідовність модульованих символів даних переставляється відповідно до заздалегідь визначеного шаблону. Це можна зробити на рівні символів або на рівні бітів.

У передачі в новому порядку замість передачі символів у їх початковому порядку, вони надсилаються в новій, перемежованій послідовності. Це можна зробити, заповнивши матрицю символами, а потім зчитуючи їх в іншому порядку, наприклад, стовпець за стовпцем.

Деінтерлівер на приймачі - на приймачі виконується зворотний процес. Деперемежувач бере отримані символи в перемежованому порядку та застосовує правило зворотного доступу, щоб відновити їх до початкової послідовності.

Покращена корекція помилок: Перетворюючи одну пакетну помилку на кілька однобітових помилок, коди корекції помилок можуть функціонувати набагато ефективніше, що призводить до зниження коефіцієнта бітових помилок (BER) та покращення загальної продуктивності системи. Специфічне для OFDM перемежування: В OFDM перемежування може застосовуватися на різних етапах. Наприклад, часовий інтерлівер (TI) може працювати з блоками символів, які будуть передаватися по кількох символах OFDM, тоді як частотний перемежувач (FI) може переставляти символи в межах одного символу OFDM, щоб пом'якшити взаємодію між TI та частотно-селективною природою каналу.

Інтерлівери покращують системи OFDM, розбиваючи пакетні помилки, що покращує коди корекції помилок та підвищує продуктивність коефіцієнта бітових помилок (BER). Вони також пропонують переваги безпеки, додаючи рівень шифрування, і можуть бути використані для зменшення коефіцієнта пікової потужності до середньої (PAPR).

Перетворює пакетні помилки на випадкові - інтерлівер бере блок даних та розподіляє біти, тому пакет помилок, спричинений згасанням, стає серією незалежних випадкових помилок. Це значно полегшує кодам виправлення помилок виправлення.

Підвищує ефективність кодів виправлення помилок перетворюючи пакетні помилки на випадкові, інтерлівер робить коди виправлення помилок (такі як згорткові коди) набагато ефективнішими у зменшенні BER.

Покращує продуктивність у певних каналах, тобто інтерлівери особливо корисні в бездротових та супутникових каналах, де пакетні помилки є поширеними.

Вони можуть навіть перевершити схеми статичного перемежування в каналах зі швидким згасанням.

Забезпечує певний ступінь шифрування - інтерлівер може бути використаним для додавання рівня безпеки шляхом скремблування даних за відомим, але неочевидним шаблоном, що ускладнює доступ до інформації для неавторизованих користувачів.

Зменшує PAPR: деякі інтерлівери, такі як хаотичний інтерлівер, можна використовувати з методами вибраного відображення (SLM) для зменшення коефіцієнта пікової потужності до середньої (PAPR) сигналу OFDM. Це корисно, оскільки високий PAPR може спричинити нелінійні спотворення в підсилювачах потужності.

Допомагає боротися з імпульсним шумом - інтерлівер може забезпечити стійкість до імпульсного шуму, який є короткими, високоамплітудними сплесками шуму, що можуть пошкодити дані.

Покращує спектральну ефективність - частотний інтерлівер може використовуватися в деяких системах для щільнішого упакування сусідніх каналів OFDM, покращуючи загальну спектральну ефективність системи.

Основними недоліками використання інтерлівера в системі OFDM є підвищена складність, зниження спектральної ефективності через передачу побічної інформації та нижча продуктивність з певними типами перемежувачів. Ці недоліки означають, що хоча перемежування є потужним інструментом для боротьби з помилками пакетної передачі, воно пов'язане зі значними компромісами щодо системних ресурсів та обчислювальної потужності.

Деякі інтерлівери, особливо ті, що використовуються для зменшення коефіцієнта пікової до середньої потужності (PAPR), вимагають значної обчислювальної потужності на приймачі для деперемежування сигналу. Складність зростає зі збільшенням розміру перемежувача або кількості перестановок для пошуку.

Для успішного деперемежування сигналу приймач часто повинен знати точний шаблон перемежування, який використовується передавачем. Це вимагає

надсилання "додаткової інформації" (SI) разом із даними, що займає цінну пропускну здатність і знижує загальну спектральну ефективність.

Не всі інтерлівери однаково ефективні. Наприклад, періодичні інтерлівери можуть працювати гірше, ніж псевдовипадкові інтерлівери в певних сценаріях, що призводить до погіршення показників продуктивності, таких як зменшення PAPR. Ефективність інтерлівера також залежить від складності системи, такої як кількість піднесучих і розмір кадру.

Процес буферизації даних для виконання операцій перемежування та деперемежування вносить додаткову затримку в систему. Деякі методи не покращують продуктивність у певних середовищах, таких як середовища з імпульсним шумом. Якщо для заданого стану каналу вибрано неправильний тип перемежувача, це може фактично збільшити ймовірність помилок декодування.

2.1.8 ARQ / HARQ (Automatic Repeat reQuest / Hybrid ARQ)

ARQ та HARQ — це механізми підвищення надійності передавання даних у мережах зв’язку, що працюють поверх фізичного каналу. Їхня основна ідея: якщо приймач виявляє помилки у пакеті, він просить передати його повторно (ARQ), або ж поєднує повторні пакети з FEC-кодами (HARQ), підвищуючи шанси на коректне відновлення. Це критично важливо для радіоканалів, супутникового зв’язку, мобільних мереж (LTE/5G), Wi-Fi, TCP/IP, IoT.

У системі OFDM ARQ (Automatic Repeat reQuest) працює таким чином, що приймач використовує коди виявлення помилок, такі як перевірка CRC, для ідентифікації пошкоджених пакетів даних. Після успішного отримання приймач надсилає підтвердження (ACK) відправнику, який потім переходить до наступного пакета. Якщо виявлено помилку, приймач надсилає негативне підтвердження (NACK), або відправник минає час очікування ACK, що спонукає відправника повторно передавати пошкоджений пакет, доки він не буде отриманий правильно.

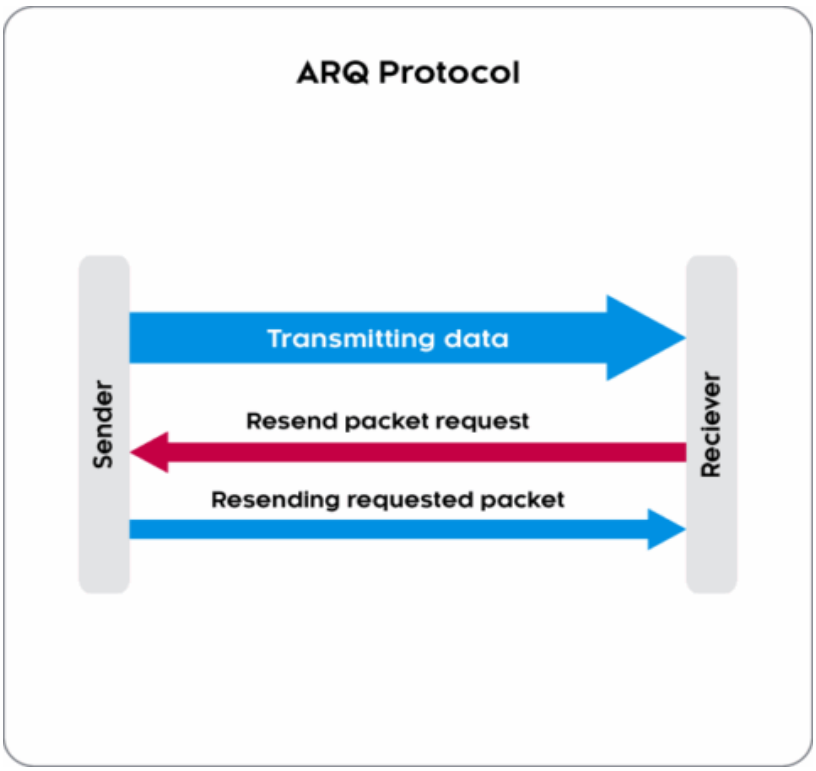


Рис.2.6 Приклад протоколу ARQ (Automatic Repeat reQuest)

Варіації протоколів ARQ включають ARQ зі зупинкою та очікуванням, ARQ з поверненням назад N та ARQ із вибірковим повторенням. Усі три протоколи зазвичай використовують певну форму протоколу ковзного вікна, щоб допомогти відправнику визначити, які (якщо такі є) пакети потрібно передати повторно. Ці протоколи знаходяться на канальному або транспортному рівнях (рівні 2 та 4) моделі OSI [22].

Протоколи ARQ покладаються на методи виявлення помилок для ідентифікації пошкоджених пакетів даних, включаючи перевірку парності та логічне підсумовування блоків повідомлень. Перевірка парності передбачає додавання біта парності до блоку бітів повідомлення, вибраного таким чином, щоб загальна кількість бітів була парною або непарною. Цей метод обмежений виявленням помилок у непарній кількості бітів, оскільки парна кількість помилкових бітів може залишитися непоміченою. Інший підхід полягає в логічному підсумовуванні вмісту кількох блоків повідомлення та додаванні результату як додаткового блоку; приймач виконує ту саму операцію та порівнює

свій результат з переданим блоком, що забезпечує вищу ймовірність виявлення помилок, ніж один біт парності [23].

OFDM розділяє дані на безліч паралельних потоків для передачі по різних піднесуючих, які можна адаптувати до співвідношення сигнал/шум (SNR) кожної піднесуючої.

OFDM використовується в каналах зі змінним або шумом, де ARQ необхідний для забезпечення надійності.

Механізм зворотного зв'язку - зворотний зв'язок ARQ (ACK/NACK) від приймача є важливим для правильної роботи механізму контролю помилок у системі OFDM.

Гібридний ARQ (HARQ): Сучасні системи, такі як ті, що базуються на LTE, часто використовують гібридний ARQ (HARQ), який поєднує ARQ з прямою корекцією помилок (FEC). FEC виправляє деякі помилки, зменшуючи кількість необхідних повторних передач, але ARQ все ще використовується для помилок, які не можуть бути виправлені за допомогою FEC.

Основними недоліками ARQ є зниження продуктивності через затримки та втрачену пропускну здатність, особливо на каналах із шумом або високою затримкою. До конкретних проблем належать: затримки від очікування підтверджень та повторних передач, низька ефективність каналу в протоколах, таких як зупинка та очікування, та значні накладні витрати від повторної передачі цілих блоків даних у схемах, таких як ARQ Go-Back-N. ARQ також має обмежене застосування для широкомовлення та може погано взаємодіяти з протоколами вищого рівня, такими як TCP.

В системі OFDM HARQ поєднує пряму корекцію помилок (FEC) з автоматичним запитом на повторення (ARQ) для швидкого відновлення даних шляхом повторних передач. Приймач декодує початковий блок даних за допомогою FEC; якщо помилки не зникають, він надсилає негативне підтвердження (NACK). Передавач може потім повторно передати оригінальний пакет або надіслати додаткову, відмінну від інших інформацію про надмірність

(інкрементальна надмірність), яку приймач поєднує з раніше отриманими даними, щоб збільшити ймовірність успішного декодування.

Гібридні схеми контролю помилок ARQ: Існує два типи гібридних схем ARQ: схема HARQ типу I та гібридна схема ARQ типу II. Поєднання схеми FEC (пряма корекція помилок) та ARQ називається гібридною схемою ARQ [24]. Переваги гібридного автоматичного повторного запиту (HARQ) включають підвищену надійність, підвищену ефективність та зменшення затримки. Це досягається шляхом поєднання кодів виправлення помилок з повторною передачею, що дозволяє виправляти деякі помилки без повної повторної передачі та використовувати інформацію з попередніх невдалих спроб для декодування наступних, покращуючи продуктивність.

HARQ значно зменшує ймовірність помилок під час передачі даних, що робить його надзвичайно важливим для таких програм, як відеоконференції та онлайн-ігри, де точність даних є критично важливою.

За допомогою таких методів, як м'яке об'єднання, приймач може об'єднати частково успішну передачу з наступними, щоб збільшити шанси на правильне декодування.

Виправляючи деякі помилки безпосередньо, HARQ мінімізує потребу в повних повторних передачах пакетів, що економить мережеві ресурси, такі як пропускна здатність.

Поєднання виправлення помилок та повторної передачі підвищує загальну пропускну здатність та ефективність використання спектру. Зменшення затримки

HARQ зменшує час, необхідний для доставки даних, мінімізуючи потребу в повних повторних передачах пакетів та використовуючи такі методи, як інкрементальна резервування, для надсилання лише відсутньої інформації.

Швидша доставка даних є важливою для програм реального часу, які потребують низької затримки.

Недоліки HARQ включають підвищену затримку та складність, вищі вимоги до пам'яті та потенційну можливість помилок повторної передачі та зупинок. Ключовими недоліками є потреба у більших буферах пам'яті, накладні витрати на

повторну передачу даних та складність декодування, що може обмежувати його ефективність у застосунках реального часу або для пристроїв з низьким енергоспоживанням.

2.1.9 Підтримка адаптивного кодування і модуляції (ACM)

Адаптивне кодування і модуляція (ACM - Adaptive Coding and Modulation) - це технологія, яка автоматично змінює модуляцію та кодову швидкість FEC у залежності від якості каналу, щоб забезпечити максимальну пропускну здатність при заданому рівні надійності. Це один із ключових механізмів сучасних систем супутникового зв’язку (DVB-S2/S2X, Viasat, Starlink, HTS, VSAT, мобільні супутникові системи), а також використовується у WiMAX, LTE, 5G, Wi-Fi.

Системи ортогонального частотного мультиплексування (OFDM) за своєю суттю підтримують адаптивне кодування та модуляцію (ACM) через адаптацію каналу, що оптимізує пропускну здатність та надійність даних шляхом динамічного налаштування схем модуляції та коефіцієнтів корекції помилок на основі умов каналу в режимі реального часу.

У більшості випадків співвідношення сигнал/шум каналу набагато вище, ніж робоче співвідношення сигнал/шум, передбачене конфігурацією. Це зазвичай називають запасом каналу. ACM може скористатися цим запасом каналу, змінюючи рівень модуляції в умовах низьких згасань, таким чином дозволяючи каналу мати вищу пропускну здатність протягом цих періодів [25].

ACM гарантує, що використовується максимально можлива модуляція, яка відповідає фактичним поточним умовам згасання каналу. Якщо на каналі відбувається згасання, система автоматично знижує рівень модуляції, щоб уникнути помилок. Коли згасання каналу закінчується, система автоматично збільшує модуляцію до максимально можливого рівня. Ці системи використовують канал зворотного зв'язку висхідного каналу що дозволяє наземному сегменту впливати на вибір параметрів модуляції та кодування відповідно до поточних умов

каналу. Однак жодна сучасна академічна робота не розглядає наслідки для безпеки зловмисників фізичного рівня, які націлені на цей висхідний канал [26].

Ключові механізми та вимоги до ACM в системах OFDM включають:

Отримання інформації про стан каналу (CSI) - приймач постійно оцінює якість бездротового каналу (наприклад, співвідношення сигнал/шум (SNR) або співвідношення сигнал/перешкода плюс шум) для кожної окремої піднесучої або групи піднесучих.

Канал зворотного зв'язку - приймач надсилає CSI назад до передавача через надійний канал зворотного зв'язку, часто у формі індикатора якості каналу (CQI).

Адаптивні алгоритми - передавач використовує цей зворотний зв'язок для реалізації алгоритмів, які вибирають найбільш відповідну схему модуляції та кодування (MCS) для поточних умов. За хороших умов для максимізації швидкості передачі даних використовується модуляція вищого порядку (наприклад, 64-QAM, 256-QAM) та надлишкове кодування з низькою корекцією помилок. У поганих умовах (наприклад, через завмирання, перешкоди) система перемикається на більш надійні схеми (наприклад, QPSK, 16-QAM) з вищими швидкостями кодування, щоб забезпечити надійний зв'язок та уникнути втрати каналу.

Адаптація для кожної піднесучої - ключовою перевагою OFDM є те, що різні піднесучі можуть зазнавати різних умов завмирання (частотно-селективне завмирання). ACM в OFDM може використовувати це, розподіляючи різні порядки модуляції та рівні потужності для окремих піднесійних, щоб максимізувати загальну спектральну ефективність, процес, відомий як розподіл бітів та енергії.

Стандартизація - такі технології, як WiMAX (IEEE 802.16), WiFi (IEEE 802.11a/g/n/ac/ax), LTE та 5G, включають ACM як фундаментальну частину своїх специфікацій фізичного рівня для забезпечення надійного та високошвидкісного бездротового доступу.

ACM в системах OFDM покращує продуктивність, максимізуючи ефективність використання пропускної здатності та пропускну здатність даних, зберігаючи при цьому надійність. Це досягається шляхом динамічного налаштування схеми модуляції та кодування на основі інформації про стан каналу

(CSI) у режимі реального часу для адаптації до змінних умов, таких як завмирання та шум. Ключові переваги включають вищу швидкість передачі даних за хороших умов, підвищену надійність за поганих умов, а також підвищену пропускну здатність та ефективність системи.

Основні недоліки підтримки адаптивного кодування та модуляції (ACM) в системі ортогонального частотного мультиплексування (OFDM) пов'язані з її підвищеною складністю, необхідністю надійного каналу зворотного зв'язку та вразливістю до ризиків безпеки, таких як глушіння.

2.2 Визначення характеристик сигналів багатоканальних модемів, що забезпечують високошвидкісну передачу інформації

Основною складністю високошвидкісної передачі по проводових каналах тональної частоти (ТЧ) є компенсація невизначених частотних характеристик, які неможливо виміряти заздалегідь.

За таких умов доцільно застосовувати багатоканальні модеми (БМ), що добре зарекомендували себе в каналах із розсіюванням. Вперше їх використали в телефонних радіолініях діапазону декаметрів, оскільки довга посилка цих модемів дає змогу ефективно зменшувати вплив багатопроменевості на завадостійкість приймання та забезпечувати високу сумарну швидкість передачі. Завдяки цим перевагам БМ отримали широке застосування і в проводових ТЧ- каналах: тривала посилка за відносно високої стійкості до імпульсних завад і переривань. Крім того, враховуючи допустимі відхилення амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик каналу, можна вибрати такі параметри сигналу, які роблять модем малочутливим (інваріантним) до цих відхилень, незалежно від їх природи. Таким чином, важливою властивістю багатоканальних модемів є відносна інваріантність їхньої завадостійкості щодо форми АФЧХ каналу зв’язку. Завдяки цьому можна або повністю відмовитися від корекції АФЧХ, або обмежитися простими фазовими коректорами, що зменшують нерівномірність групового часу затримки до прийнятних значень для одного чи кількох переприймальних сегментів.

Доцільність застосування БМ у проводових каналах підтверджена експериментами та практичними реалізаціями. Проте й досі відсутня формалізована методика вибору параметрів сигналів, від яких значною мірою залежить ефективність цих модемів.

Одним із ключових параметрів БМ є кількість піднесучих (підканалів). За інших однакових умов збільшення їх числа призводить до зростання тривалості тактового інтервалу та зменшення ефективно використовуваної смуги частот, що в комплексі знижує вплив неідеальності АФЧХ каналу. Водночас із ростом кількості підканалів підвищується обсяг операцій, які виконуються під час модуляції та демодуляції, а також зростає вплив частотного розладу та фазового тремтіння каналу. Оптимальне значення міжканальної відстані W, яке забезпечує модему властивість відносної інваріантності, можна визначити через обчислення потужності міжканальної перехідної завади (МПЗ), що виникає внаслідок неідеальності АФЧХ.

Під час визначення параметрів сигналів БМ вважаються заданими: Δf - смуга пропускання каналу; V - швидкість передавання інформації; K - ціла кратність модуляції; АЧХ і ФЧХ каналу задаються нормованими шаблонами, а для кожної кількості переприймань установлено відповідні норми допустимої нерівномірності АЧХ.

$$\Psi_1(\omega) = 1{,}57\left\{\sin\left[2\pi\frac{(\omega-\omega_н)}{(\omega_в-\omega_н)}\right]+\frac{3{,}8(\omega-1900\cdot 2\pi)}{(\omega_в-1900\cdot 2\pi)}\right\} \quad (5)$$

Де ω - значення поточної частоти; $\omega_в$, $\omega_н$ - значення відповідно ВЧ і НЧ.

За фіксованої ω смуги потужність міжпідканальної завади не буде монотонно зменшуватися зі збільшенням, Δt_i оскільки при цьому зростає ефективна відстань між піднесучими Δf , що наближає крайні піднесучі до меж канального спектра та зменшує Δf_2. Тому для будь-якого каналу існує оптимальна тривалість Δt_i або T, за якої потужність МПЗ досягає мінімуму.

На L-му тактовому інтервалі груповий сигнал на виході модулятора має вигляд:

$$S_l(t)=\sum_{n=1}^{W}S_{n,l}(t)=\sum_{n-1}^{W}a_{n,l}\cos\left[\left(n+\frac{n_0}{2}\right)2\pi\cdot\Delta Ft+\varphi_{n,l}\right],$$
$$l\tau-\frac{\tau}{2}\le t\le l\tau+\frac{\tau}{2},\ l=1,\ldots,m, \quad (6)$$

де $a_{n,l}$ та $\varphi_{n,l}$ — відповідно амплітуда і початкова фаза сигналу; n0 — ціле число, що визначає розташування піднесучих у смузі пропускання каналу і вибирається так, щоб виконувалися необхідні нерівності:

$$f_1=\left(n_1+\frac{n_0}{2}\right)\Delta F>300\,\text{Гц};$$
$$f_W=\left(n_W+\frac{n_0}{2}\right)\Delta F<3400\,\text{Гц},$$
де $n_1=1$, $n_W=\text{W}$. (7)

Багаточастотна структура модема та використання шаблонів його амплітудно-частотної (АЧХ) і групової часової (ГЧЗ) характеристик зумовлюють застосування спектрального підходу до обчислення потужності міжпідканальних завад (МПЗ). Орієнтація на реалізацію розрахунків на ЕОМ вимагає подання групового сигналу у вигляді періодичного, з періодом, що перевищує тривалість перехідних процесів.

Потужність МПЗ визначалась для послідовності окремих прямокутних імпульсів групового сигналу з періодом $T \gg T$в. п. дет тривалістю тактового інтервалу. При цьому, для спрощення, можна вважати $\tau 2 = 0$ і вилучити індекс (і) з формул. Використовуючи розклад у ряд Фур'є для послідовності прямокутних відеоімпульсів тривалістю τ і періодом Tn, отримуємо:

$$\frac{2\pi}{\Omega} \quad (8)$$

Zc.m. та Zs.m. відліки на косинусному та синусному виходах корелятора відповідно, взяті після завершення інтегрування; S(t) — груповий сигнал на виході каналу зв'язку, $\Phi(t) = Si(t)$.

Якщо на вхід корелятора з опорною частотою $\omega m\big($де $m = p(2m + m1)m = p(2m + m1)\big)$ надходить одна зі спектральних складових S(t), наприклад:

$$S{\sim}kN = akN\cos[kNt + \Phi kN + \psi(kN)], \qquad (9)$$

Для виділення окремих підканалів у багатоканальних демодуляторах використовується кореляційний метод обробки. У цьому випадку для кожного підканалу $1 \leq m < W$ обчислюють:

$$Zm = \int_{t_0}^{t_o+\tau} t0t0 + \tau S(t)e - j\omega mtdt = Zmc.m. + jZms.m., \qquad (10)$$

де *t0* — момент початку інтегрування, S(t) — сигнал на вході демодулятора, — відповідно косинуса та синусна складові результату кореляції для m-го підканалу.

Як і очікувалося, найбільш вразливими виявляються ті канали, які розташовані поблизу меж смуги пропускання тракту. Це зумовлено особливостями частотних спотворень, що вносить тракт: саме на його межах різко зростає нелінійність фазо-частотної та амплітудно-частотної характеристик.

Якщо тривалість перехідних процесів перевищує захисний інтервал і встановлення сигналу відбувається вже під час його обробки демодулятором, то фільтрація групового сигналу супроводжується появою перехідної завади. Вона виникає внаслідок порушення ортогональності канальних сигналів.

Залежності δ(Δt) для W=24,48,60 та 96 при кількості переприйманнь від 1 до 5 наведено на рис. 2.9–2.13. Вони підтверджують, що за фіксованого значення W можна мінімізувати МПЗ шляхом правильного вибору Δt (або T), а також послабити вплив частотних спотворень каналу шляхом збільшення значення W.

Залежності мінімальних значень δmin від кількості підканалів у модемі для різної кількості переприйманнь наведено на рис. 2.14.

Під час вибору параметрів модема, зокрема величини W, необхідно забезпечити, щоб МПЗ на фоні інших завад не спричиняла помітного погіршення завадостійкості. Відомо, що рівень групового сигналу на виході ТЧ-каналу

становить приблизно 10 дБ, а допустимий рівень шуму — близько 40 дБ. За умов, коли δ≈1%, вплив МПЗ практично непомітний на фоні шуму, тобто МПЗ дорівнює 3 дБ. Для чотирирівневої амплітудно-фазорізницевої модуляції (АФРМ) значення h^2, яке забезпечує імовірність помилки приблизно 25 дБ.

Наприклад, якщо прийняти допустимим значення δ=3%, то згідно з розрахунками при W=24 прийнятний рівень МПЗ без коригування АФЧХ може бути забезпечений лише за умови наявності в каналі не більш як одного переприймання.

Якщо ж W = 96, то такі самі вимоги до якості модема виконуються навіть за наявності в каналі до п’яти переприймань.

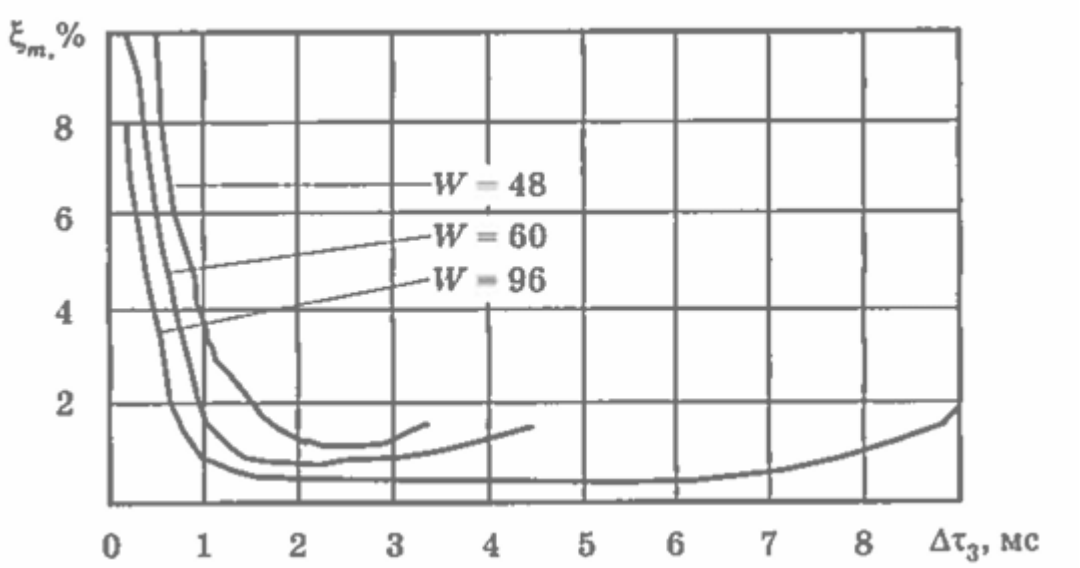


Рис. 2.9 Залежність δm від $\Delta t3$ від одного переприймання для різних значень W

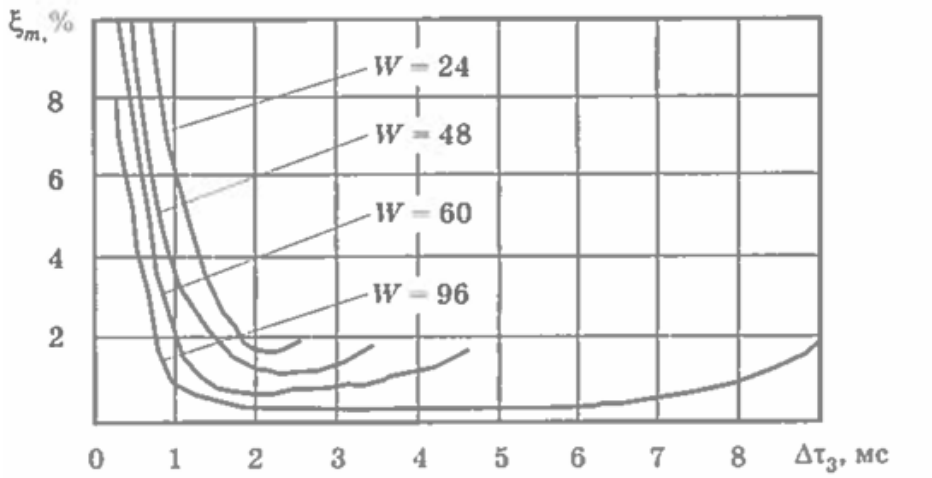


Рис. 2.10 Залежність δm від Δt3 для двох переприймань для різних значень W

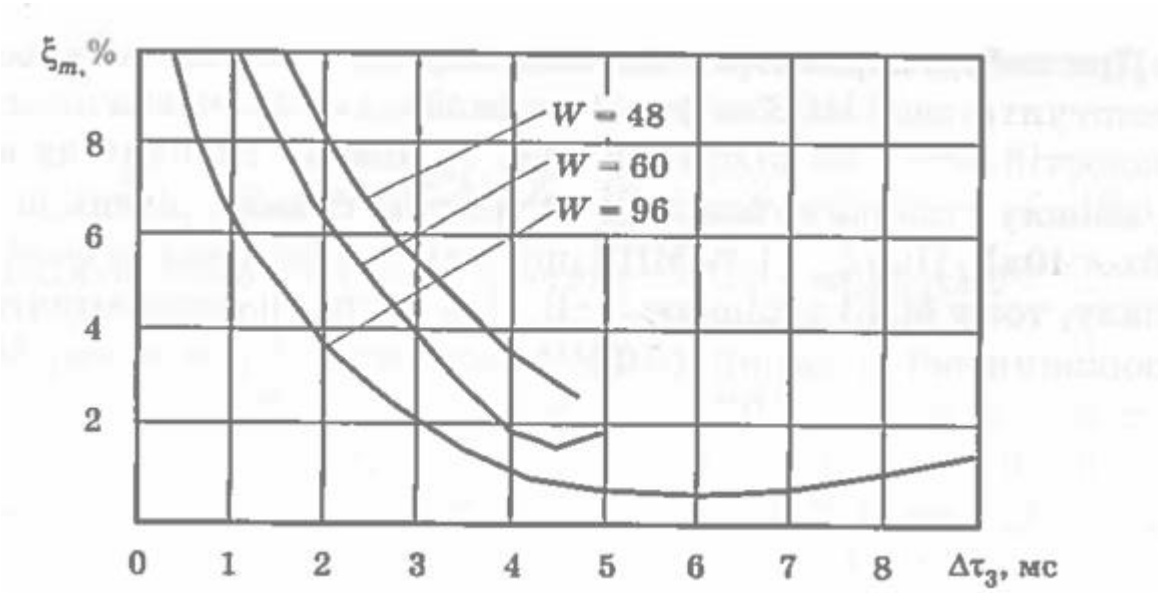


Рис. 2.11 Залежність δm від Δt3 для трьох переприймань для різних значень W

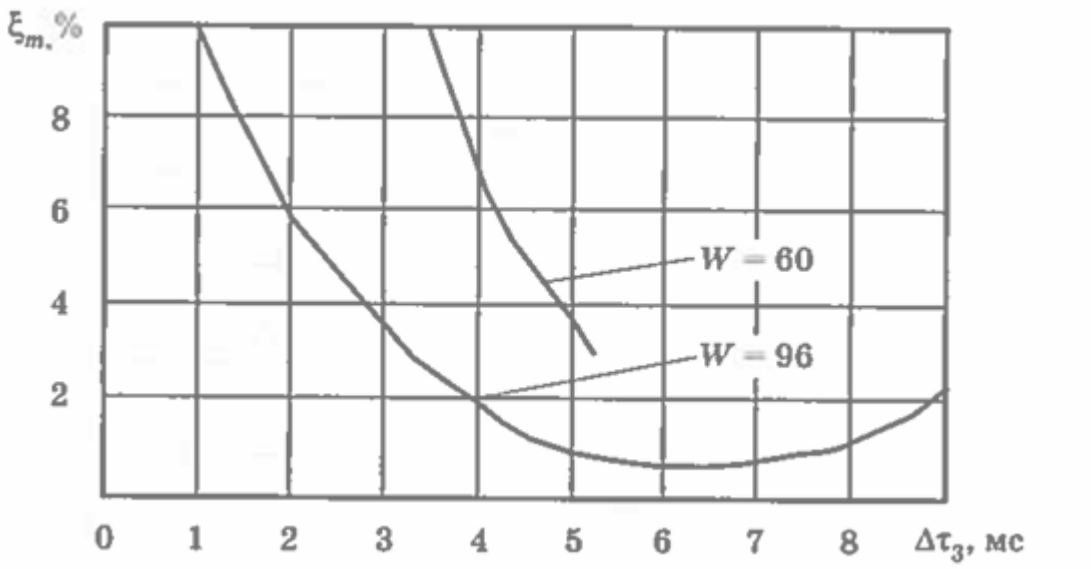


Рис. 2.12 Залежність δm від Δt3 для чотирьох переприймань для різних значень W

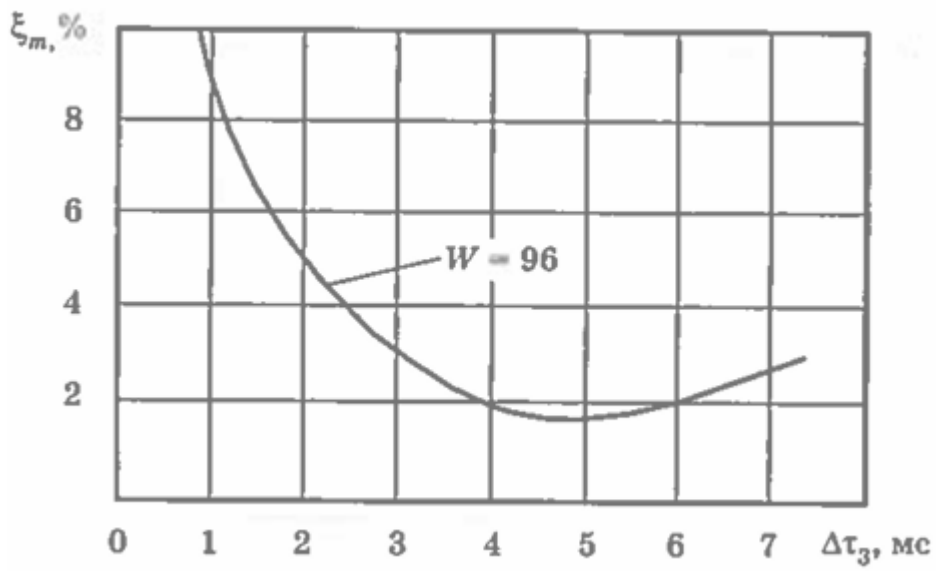


Рис. 2.13 Залежність δm від Δt3 для п’ятьох переприймань для різних значень W

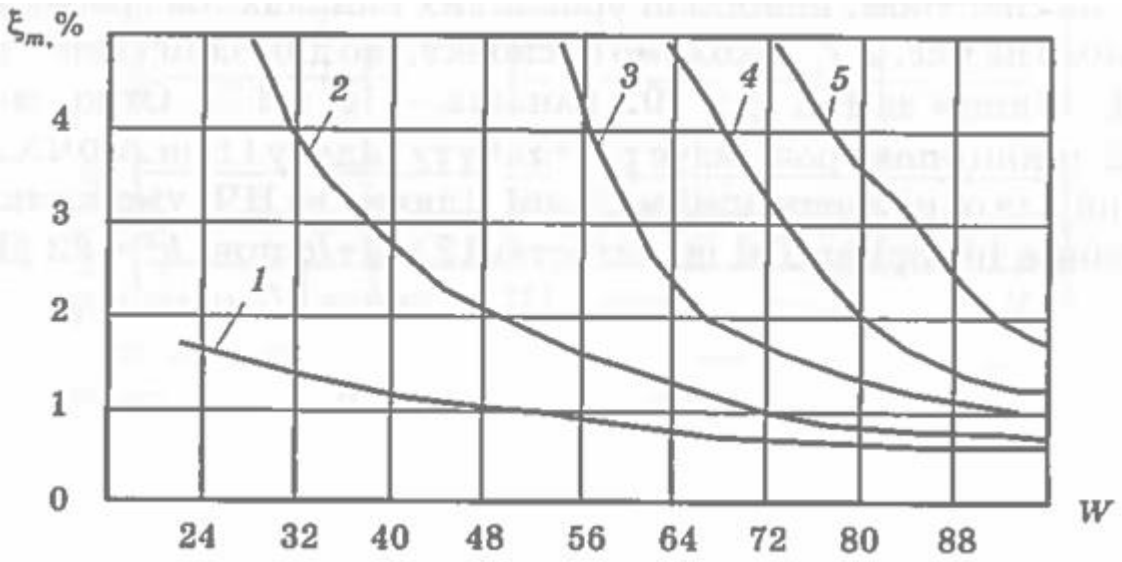


Рис. 2.14 Залежність мінімально досяжних δm для одного-п’яти переприймань для різних значень W (криві відповідно 1-5)

Запропоновано методику визначення кількості підканалів та основних параметрів багатоканальних модемів, призначених для роботи у стандартних каналах зв’язку з різними характеристиками. Проведені розрахунки дали змогу сформулювати рекомендації щодо вибору параметрів багатоканального модема, а також визначити оптимальний набір параметрів для швидкості передавання 12 кбіт/с із чотирикратною модуляцією та різною кількістю переприймальних ділянок за НЧ, а також для швидкості 14,4 кбіт/с із п’ятикратною модуляцією.

Проаналізовано вплив вибору початкового моменту інтегрування на величину міжканальної перехідної завади та сформульовано вимоги до пристрою тактової синхронізації багатоканального модема.

Показано, що під час роботи БМ у проводовому ТЧ-каналі зі швидкістю 9,6 кбіт/с вплив міжсимвольних завад є незначним, тоді як для швидкостей 12,2 та 14,4 кбіт/с необхідно додатково враховувати внесок МСЗ.

На основі розрахунків встановлено, що збільшення кількості підканалів у БМ не лише зменшує величину МПЗ, а й розширює допустимий діапазон похибок пристрою тактової синхронізації.

Наведено результати визначення допустимого діапазону моменту початку інтегрування для різної кількості підканалів та різної кількості переприймальних ділянок.

2.3 Оптимальне некогерентне приймання сигналів з фазорізницевою модуляцією першого порядку

Фазорізницева модуляція (ФРМ) першого порядку передбачає, що інформація кодується різницею фаз між сусідніми елементами, а не абсолютним значенням фази. Це важливо, оскільки за таких умов абсолютна початкова фаза сигналу не є необхідною для приймання — що й відкриває можливість некогерентних методів обробки.

Відповідно до загальних положень теорії оптимального приймання розглянемо побудову алгоритмів оптимального некогерентного приймання сигналів із ФРМ. Припустимо, що на вхід демодулятора надходить один із mmm рівноймовірних і рівнопотужних сигналів тривалістю τ :

$$Sj(t) = Sj(t)cos\varphi + Sj*(t)sin\varphi,\ \ j = 1,2,\dots,m;\ 0 \le t \le \tau. \qquad (2.11)$$

із випадковою початковою фазою φ, рівномірно розподіленою на інтервалі [0, 2π], та білим гаусівським шумом n(t). У такому разі прийнятий сигнал має вигляд:

$$x(t) = S_m(t) + n(t) \qquad (12)$$

Для некогерентного приймання ймовірність помилки буде мінімальною тоді, коли демодулятор вибирає той сигнал S1 , для якого для всіх m≠1 виконується нерівність:

$$\left[\int_0^\tau x(t)S_i(t)dt\right]^2+\left[\int_0^\tau x(t)S_i^*(t)dt\right]^2>$$
$$>\left[\int_0^\tau x(t)S_j(t)dt\right]^2+\left[\int_0^\tau x(t)S_j^*(t)dt\right]^2. \quad (13)$$

Зірочкою позначено перетворення Гільберта сигналів Sm та Sn.

Для ФРМ першого порядку значення τ дорівнює тривалості двох посилок сигналу, тобто τ=2T. Тому алгоритм оптимального некогерентного демодулятора формулюється так: на інтервалі другої посилки слід ухвалювати рішення на користь того варіанта сигналу Sm, для якого різниця фаз Δφ задовольняє умову:

$$S_i(t)=\begin{cases}a\sin\omega t, & 0<t\le T;\\ a\sin(\omega t+\Delta\varphi_i), & T<t\le 2T,\end{cases} \quad (14)$$

якщо при всіх $j \neq i$:

$$\left[\int_{(n-1)T}^{nT} x(t)\sin\omega t dt+\int_{nT}^{(n+1)T} x(t)\sin(\omega t+\Delta\varphi_i)dt\right]^2+$$
$$+\left[\int_{(n-1)T}^{nT} x(t)\cos\omega t dt+\int_{nT}^{(n+1)T} x(t)\cos(\omega t+\Delta\varphi_i)dt\right]^2>$$
$$>\left[\int_{(n-1)T}^{nT} x(t)\sin\omega t dt+\int_{nT}^{(n+1)T} x(t)\sin(\omega t+\Delta\varphi_j)dt\right]^2+$$
$$+\left[\int_{(n-1)T}^{nT} x(t)\cos\omega t dt+\int_{nT}^{(n+1)T} x(t)\cos(\omega t+\Delta\varphi_j)dt\right]^2. \quad (15)$$

Виконавши в попередньому прикладі прості перетворення та використавши позначення:

$$\left.\begin{aligned} X_{n-1} &= \int_{(n-1)T}^{nT} x(t)\sin\omega t dt, \quad X_n = \int_{nT}^{(n+1)T} x(t)\sin\omega t dt; \\ Y_{n-1} &= \int_{(n-1)T}^{nT} x(t)\cos\omega t dt, \quad Y_n = \int_{nT}^{(n+1)T} x(t)\cos\omega t dt, \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

отримуємо алгоритм:

$$\begin{gathered} \cos\Delta\varphi_i(X_{n-1}X_n + Y_{n-1}Y_n) + \sin\Delta\varphi_i(X_{n-1}Y_n - Y_{n-1}X_n) > \\ > \cos\Delta\varphi_j(X_{n-1}X_n + Y_{n-1}Y_n) + \sin\Delta\varphi_j(X_{n-1}Y_n - Y_{n-1}X_n), \\ j = 1, 2, \ldots, m; \quad j \neq i. \end{gathered} \tag{17}$$

Отримана система нерівностей є найбільш загальним виглядом алгоритму оптимального некогерентного приймання сигналів із ФРМ-1, придатним для реалізації за будь-якого набору інформаційних різниць фаз: $\Delta\varphi 1,\ \Delta\varphi 2,\ \ldots,\ \Delta\varphi m.$

Зміст алгоритму полягає в такому. У демодуляторі обчислюються косинуси кутів, що є різницею між кутом, утвореним векторами двох сусідніх посилок прийнятого сигналу і усіма припустимими кутами між відповідними посилками переданих сигналів. Перевага надається тій з альтернатив, для якої значення цього косинуса є найбільшим.

Особливість оптимального некогерентного приймання полягає в тому, що кут між векторами сусідніх посилок визначається через їхні проекції на два взаємно ортогональні гармонічні коливання — sinωt і cosωt (квадратурне приймання). Тому величини Xn і Yn, отримані згідно з однією із попередніх дій, фактично є проекціями посилки прийнятого сигналу на координатні осі sinωt та cosωt.

Через ці проекції можна знайти тригонометричні функції кута $\Delta\varphi_{nE}$між векторами (n−1)-ї та n-ї посилок прийнятого сигналу:

$$\left.\begin{aligned} \cos\Delta\varphi_{n\xi} &= \frac{X_{n-1}X_n + Y_{n-1}Y_n}{\sqrt{X_{n-1}^2 + Y_{n-1}^2}\sqrt{X_n^2 + Y_n^2}}, \\ \sin\Delta\varphi_{n\xi} &= \frac{X_{n-1}Y_n + Y_{n-1}X_n}{\sqrt{X_{n-1}^2 + Y_{n-1}^2}\sqrt{X_n^2 + Y_n^2}}. \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

Таким чином, вираз у дужках у (17) пропорційний косинусу та синусу різниці фаз між сусідніми посилками прийнятого сигналу. Тому можна подати в еквівалентному вигляді:

$$cos\Delta\varphi j\ cos\Delta\varphi nE + sin\Delta\varphi j\ sin\Delta\varphi nE > cos\Delta\varphi i\ cos\Delta\varphi nE + sin\Delta\varphi i\ sin\Delta\varphi nE \quad (2.19)$$

або у більш компактній формі:

$$\cos(\Delta\varphi nE - \Delta\varphi j) > \cos(\Delta\varphi nE - \Delta\varphi i),\ j = 1,2,\dots,m;\ j \neq i. \quad (20)$$

Використавши (17), можна отримати значно простіші алгоритми для конкретних типів сигналів. Для однократної ФРМ-1 з різницями фаз Δφ1=0 та Δφ2=π маємо:

$$Xn-1Xn + Yn-1Yn \succ (Xn-1Xn + Yn-1Yn), \quad (21)$$

тобто переданий двійковий символ визначається за правилом:

$$J = sgn(Xn-1Xn + Yn-1Yn). \quad (22)$$

Отриманий алгоритм (22) відіграє важливу роль у теорії приймання сигналів із фазовою модуляцією. Він реалізується в демодуляторі, структурну схему якого наведено на рис. 2.15. На відміну від поширених квазікогерентних демодуляторів, тут опорний генератор працює автономно, не синхронізується з несучою та має невідому початкову фазу, що значно спрощує реалізацію пристрою.

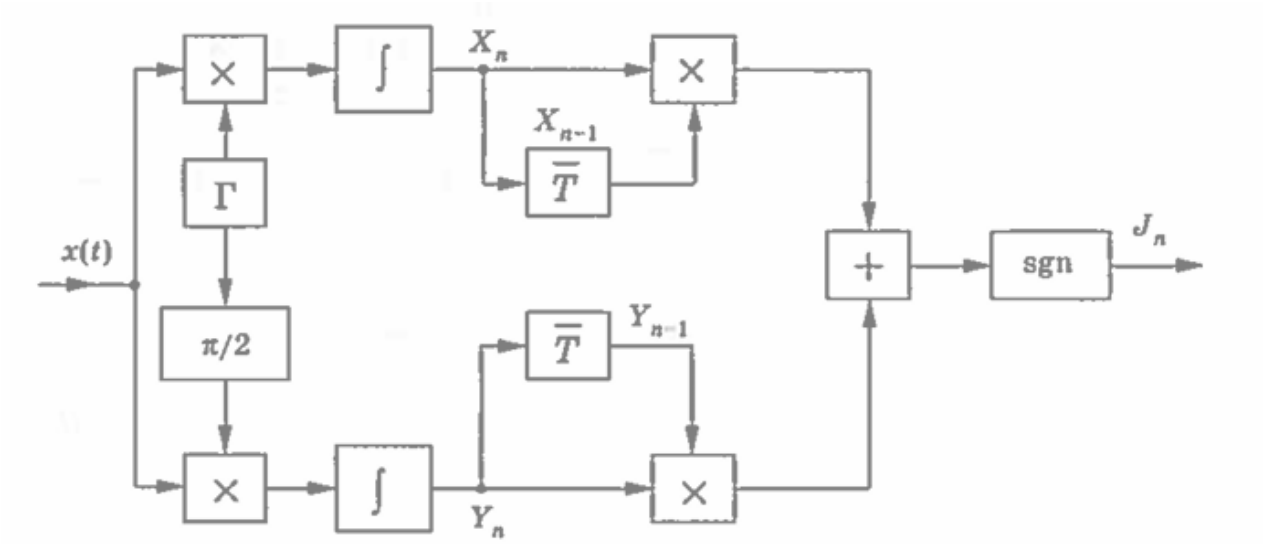


Рис.2.15 Демодулятор оптимального некогерентного приймання для однократних ФРМ-1 сигналів

При цьому частота опорного генератора повинна збігатися з частотою несучої ФМ-сигналу; допустимі невеликі відхилення, однак вони знижують завадостійкість. Для роботи таких елементів демодулятора, як інтегратор зі скиданням, елемент пам’яті на інтервал Т, та реєстратор знаку sgn, також потрібен пристрій тактової синхронізації.

Звернемо увагу на важливу особливість алгоритму (22) та розглянутого демодулятора: його завадостійкість лише трохи (менше ніж на 1 дБ) поступається ідеальному когерентному демодулятору, при цьому він не потребує інформації про початкову фазу сигналу. Водночас така схема значно простіша за когерентні демодулятори однократних сигналів.

Оптимальне некогерентне приймання можна реалізувати навіть без пристрою пам’яті для результатів обробки попередньої посилки (див. рис. 2.15). Для цього використовують початковий алгоритм (13), який у випадку однократної ФРМ-1 з варіантами різниць фаз $\Delta\varphi 1=0$ та $\Delta\varphi 2=\pi$ можна подати у вигляді:

$$J=\operatorname{sgn}\left\{\left[\int_0^{2T} x(t)\sin\omega t\,dt\right]^2+\left[\int_0^{2T} x(t)\cos\omega t\,dt\right]^2-\right.$$
$$-\left[\int_0^{2T} x(t)\sin\omega t\left(\operatorname{sgn}\sin\frac{\pi}{T}t\right)dt\right]^2-$$
$$\left.-\left[\int_0^{2T} x(t)\cos\omega t\left(\operatorname{sgn}\sin\frac{\pi}{T}t\right)dt\right]^2\right\}. \tag{23}$$

В теорії зв’язку оптимальним некогерентним прийманням називають алгоритм, який мінімізує ймовірність помилки при прийманні елемента сигналу в каналі з гаусівським білим шумом за умов випадкової та рівномірно розподіленої початкової фази. Окрім початкової фази, усі інші неінформаційні параметри сигналу — частота, тривалість обробки тощо — в оптимальному некогерентному прийманні повинні бути відомі напевне. Амплітуда сигналу може залишатися

невідомою, якщо застосовуються сигнали з однаковою енергією. Для сигналів із фазовою модуляцією оптимальний некогерентний метод дозволяє визначати лише передану різницю фаз, оскільки абсолютна фаза при такій обробці принципово невідома.

Якщо початкова фаза сигналу невідома або її вдається оцінити з малою точністю, когерентний чи квазікогерентний демодулятор практично втрачає працездатність, у той час як некогерентний забезпечує стабільну завадостійкість. Якщо ж фазу можна визначити з достатньою точністю, ефективними є як когерентні, так і некогерентні схеми, причому когерентний демодулятор у таких умовах має вищу завадостійкість. Його перевага залежить від кратності модуляції, розмірності оброблюваної ділянки сигналу та інших параметрів.

Програш завадостійкості оптимального некогерентного приймання порівняно з когерентним збільшується із зростанням позиційності сигналів та розмірності обробки. Так, для чотирипозиційної ФРМ програш більший, ніж для двопозиційної; аналогічно, приймання сигнально-кодової конструкції в цілому є менш ефективним, ніж поелементне.

Між випадками повністю відомої та повністю невідомої початкової фази існує широкий спектр проміжних ситуацій. Початкова фаза може змінюватися в часі, але водночас піддаватися оцінюванню з певною точністю. Співвідношення між завадостійкістю квазікогерентного та оптимального некогерентного методів у таких умовах визначається динамікою фазових і частотних змін, наявними апріорними даними, відношенням між тривалістю елемента, тривалістю сеансу зв’язку, інтервалом кореляції фази та можливостями технічних засобів відстеження частоти й фази.

Невизначена початкова фаза природним чином виникає на початку будь-якого сеансу зв’язку, при коротких сеансах, під час передавання окремих імпульсів або пакетів, розділених паузами, а також у ситуаціях із браком достатньої передісторії сигналу. Подібні умови характерні і для неперервних систем передавання, що працюють через канали зі швидкозмінними параметрами. У каналі, де фаза змінюється швидше, ніж її можна коректно оцінити, оптимальне

некогерентне приймання часто забезпечує кращу завадостійкість, ніж квазікогерентне. При цьому похибка встановлення опорної фази у квазікогерентних схемах може перевищувати теоретичний програш некогерентного методу.

Некогерентне приймання може бути доцільним і в інших умовах. Наприклад, хоча для каналів зі сталими параметрами когерентне приймання сигналів із однократною ФРМ має дещо вищу завадостійкість, різниця в ефективності невелика. Водночас некогерентний демодулятор значно простіший, бо не потребує формування когерентних опорних коливань, що нерідко є вирішальним фактором. Існують також субоптимальні некогерентні алгоритми, які близькі за завадостійкістю до оптимальних, але реалізуються ще простіше.

На відміну від когерентного приймання сигналів без надлишковості, де обробка кількох елементів сигналу не дає виграшу в завадостійкості, у разі оптимального некогерентного приймання сигналів із ФРМ збільшення інтервалу обробки веде до зменшення ймовірності помилки. За умови сталої початкової фази на всьому інтервалі обробки ймовірність помилки наближається до показників когерентного приймання. Таким чином, оптимальне некогерентне приймання ФРМ-сигналів дозволяє, за рахунок збільшення інтервалу обробки, досягти майже такої самої завадостійкості, як при когерентному прийманні, без необхідності оцінювати початкову фазу. Саме тому такі алгоритми широко застосовуються в багаточастотних (багатоканальних) системах з ортогональними каналами, що використовуються для цифрової передачі інформації.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ КЛІМАТУ НА СУПУТНИКОВИЙ ЗВ’ЯЗОК

Супутникова галузь все частіше використовує вищі радіочастотні діапазони, такі як Ka-діапазон, для високопродуктивних супутників та дуже високопродуктивних супутників. Вищі частотні діапазони забезпечують пропускну здатність, необхідну для різних високошвидкісних послуг передачі даних та зв'язку, включаючи широкосмуговий Інтернет та пряме телевізійне трансляцію [27]. Вплив клімату на супутниковий зв’язок дуже суттєвий, особливо для систем у високих частотних діапазонах (Ku, Ka, Q/V). Кліматичні умови можуть призводити до погіршення якості сигналу, збільшення затримок, втрати кадрів або повного обриву зв’язку. Також вплив клімату на супутниковий зв’язок у надзвичайних ситуаціях (НС) є критично важливим, тому що саме тоді супутниковий канал часто є єдиним доступним способом зв’язку. Кліматичні зміни, особливо підвищення температури атмосфери, роблять супутники більш вразливими до сонячних бурь, що ускладнює супутниковий зв'язок під час надзвичайних ситуацій, оскільки це може переривати GPS та комунікаційні системи, критично важливі для координації рятувальних операцій. Сильніші геомагнітні збурення від сонячної активності спотворюють радіосигнали, що йдуть від супутників до Землі, знижуючи якість та надійність зв'язку (GPS, супутниковий інтернет). У надзвичайних ситуаціях (землетруси, повені, урагани), коли наземні мережі пошкоджені, супутниковий зв'язок стає життєво важливим; кліматичні фактори, посилені змінами клімату, роблять цю резервну систему менш надійною. Ненадійний GPS спричиняє порушення навігації та ускладнює роботу рятувальних служб. Збої в комунікаціях призводять до переривання зв'язку між оперативними групами та унеможливлюють координацію допомоги. Затримки в отриманні даних обмежують доступ до метеорологічної інформації та відомостей про надзвичайну ситуацію.

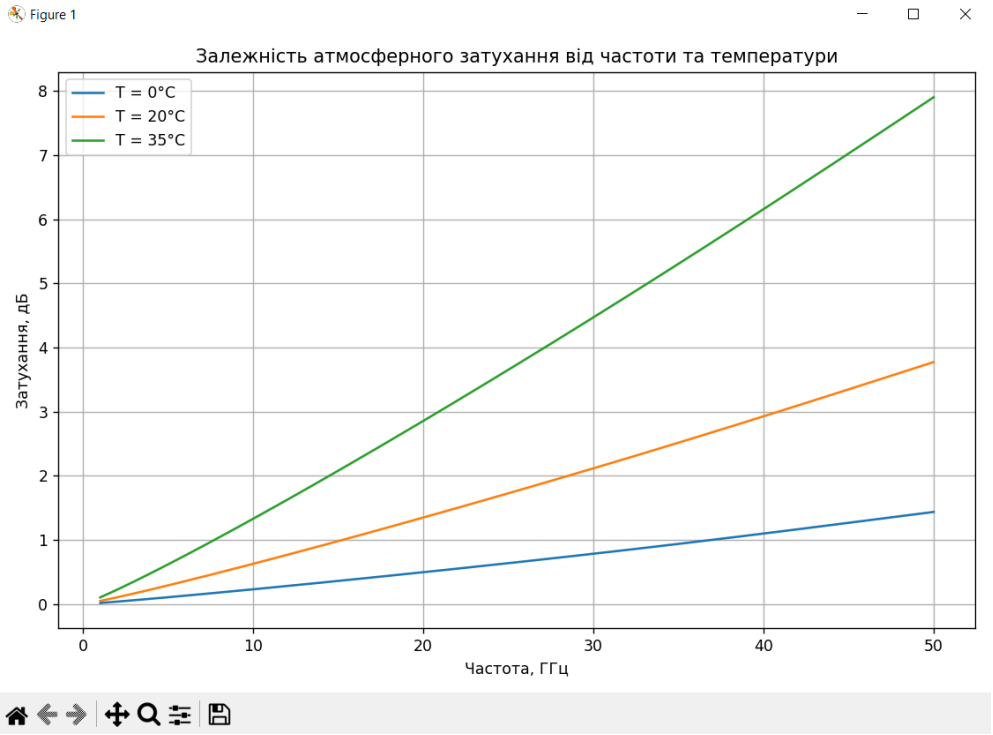


Рис.3.1 Залежність затухання сигналу в атмосфері від частоти та температури

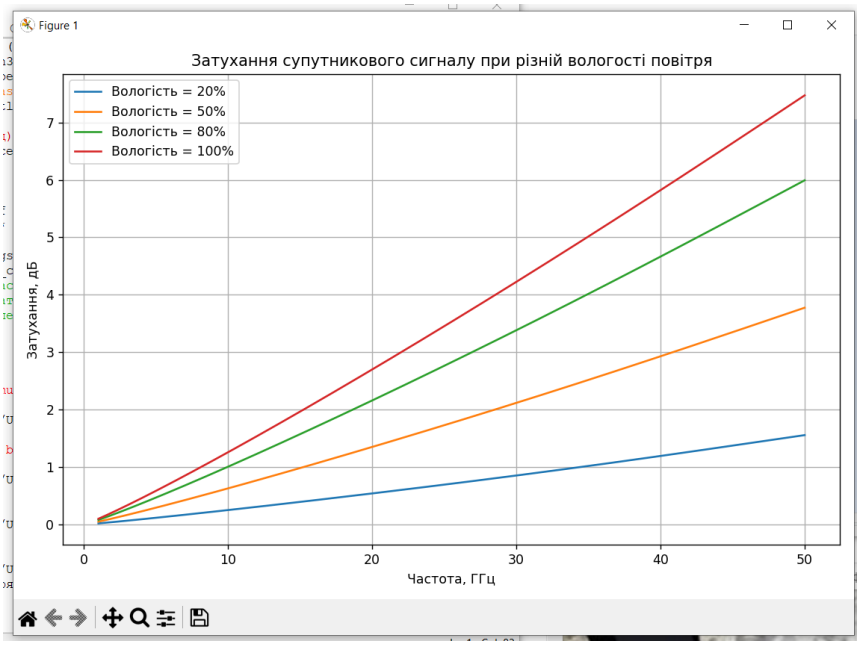


Рис.3.2 Затухання супутникового сигналу при різній вологості повітря

Туман складається з крихітних зважених крапельок води, зазвичай менше 100 мікрометрів у діаметрі. Незважаючи на свій малий розмір, вони можуть спричиняти втрати на розсіювання на міліметрових хвилях. На частоті 60 ГГц, яка зазвичай вважається ближньою для бездротових ліній зв'язку, затухання через туман може становити кілька дБ на кілометр, що достатньо, щоб зробити довші лінії ненадійними.

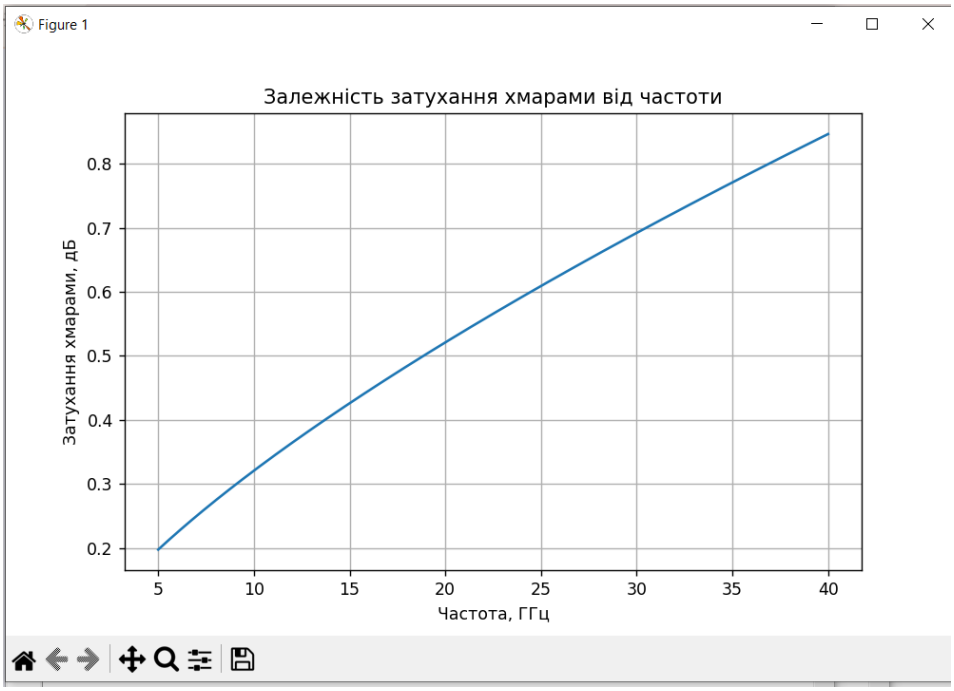


Рис.3.3 Графік залежності затухання супутникового сигналу хмарами від частоти

Вітри впливають на супутниковий зв'язок, фізично переміщуючи супутникову антену, що призводить до її зміщення та погіршення якості сигналу. Сильні вітри, такі як вітри від ураганів, можуть спричинити уповільнення з'єднання або навіть тимчасові перебої, зміщуючи антену з положення. Хоча сам вітер не блокує радіохвилі, як сильний дощ, фізичний рух, що виникає в результаті цього, є значною причиною перебоїв у сигналі супутникових антен. Сильні вітри також можуть змінювати температурну стратифікацію в атмосфері, що змінює умови заломлення.

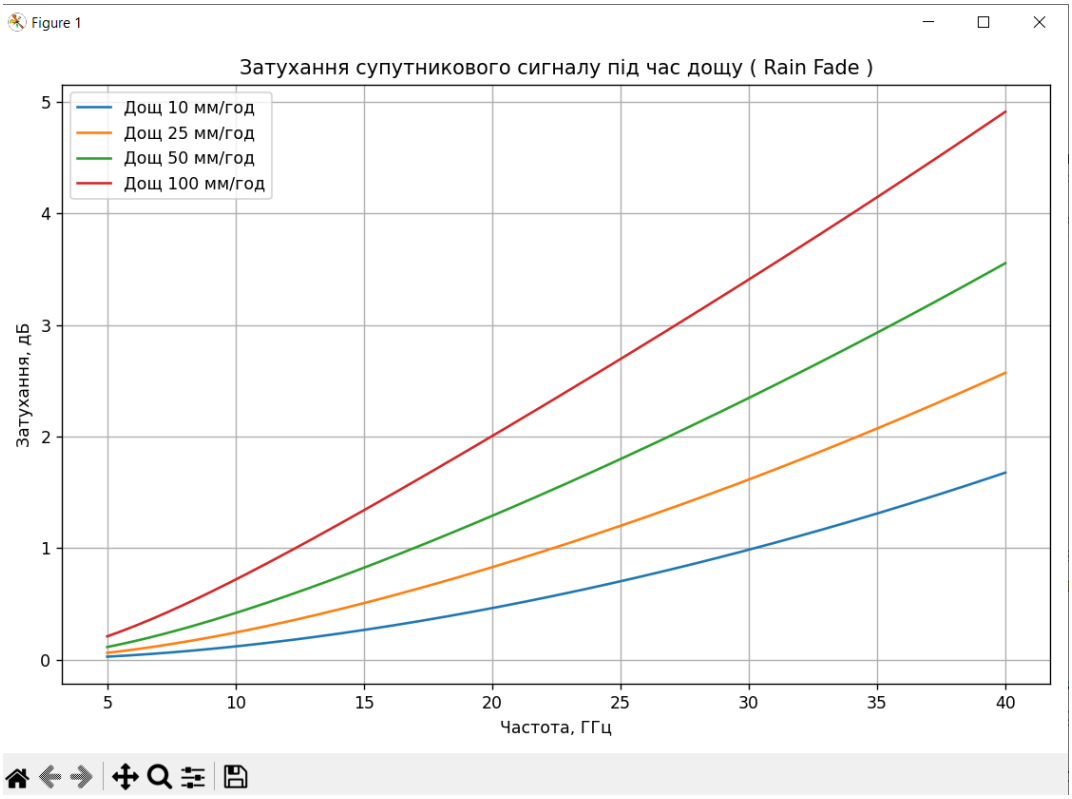


Рис.3.3 Затухання супутникового сигналу під час дощу

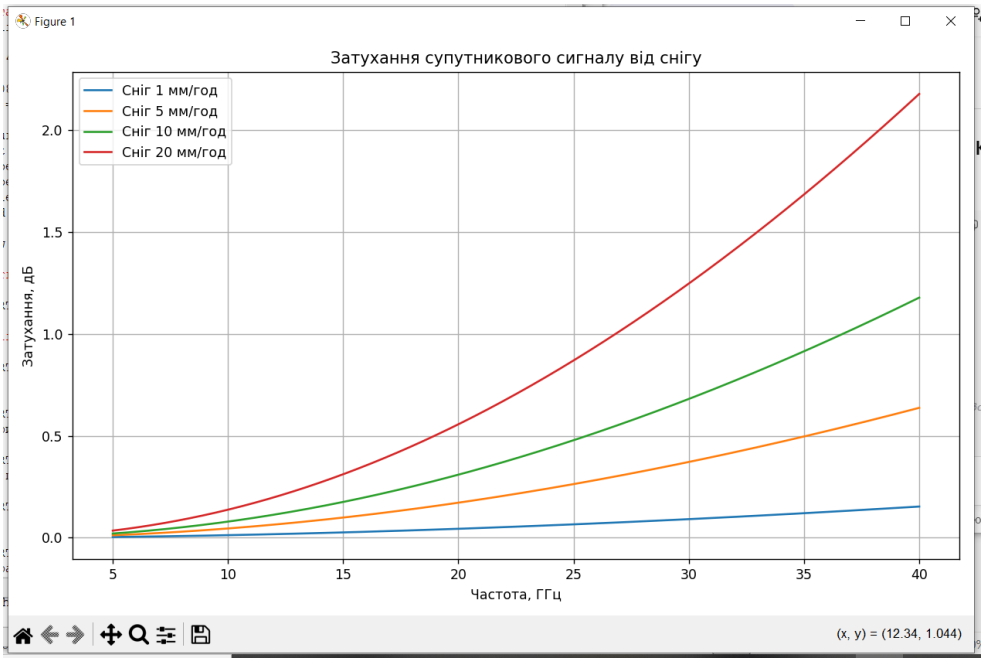


Рис.3.4 Затухання супутникового сигналу під час снігу

Полярні умови впливають на супутниковий зв'язок через іоносферні збурення у високих широтах, такі як явища поглинання полярної шапки (PCA), спричинені сонячною активністю, та іоносферні нерівності, які можуть призвести до згасання сигналу та перебоїв. Крім того, екстремальний холод та ізоляція

полярних регіонів вимагають надійного обладнання та можуть спричинити проблеми з покриттям наземних станцій, що вимагає використання ретрансляційних супутників та негеостаціонарних орбіт, таких як високоеліптичні орбіти, для безперервного зв'язку.

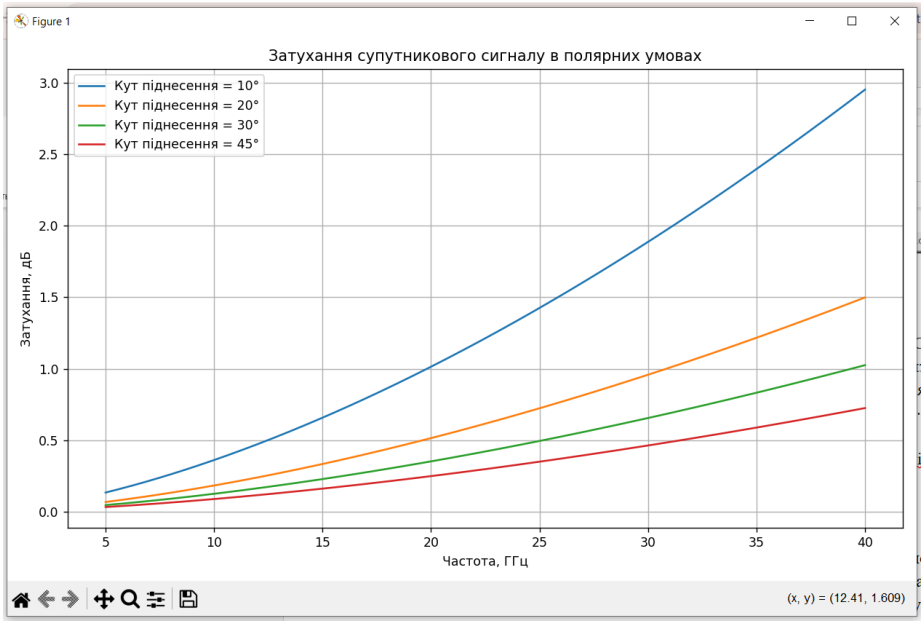


Рис.3.5 Графік затухання супутникового сигналу в полярних умовах

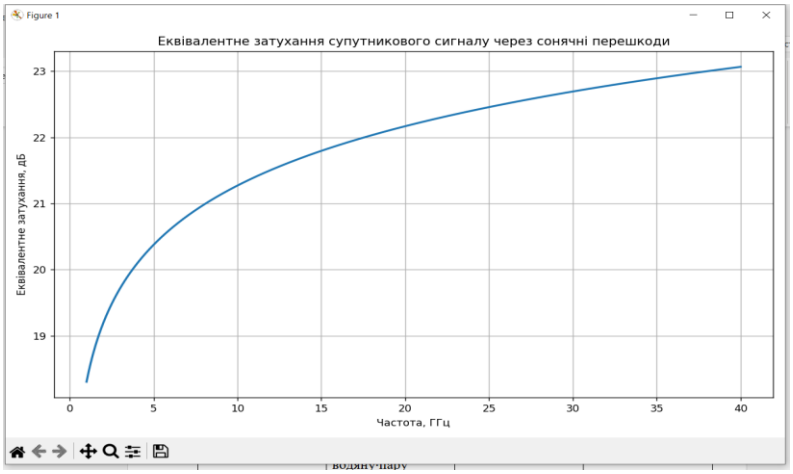


Рис.3.6 Графік еквівалентного затухання супутникового сигналу через сонячні перешкоди

Таблиця 3.1

Вплив кліматичних та атмосферних факторів на супутниковий зв’язок

Кліматичний фактор	Механізм впливу	Втрати та наслідки	Найбільш вразливі діапазони
Дощ	Поглинання та розсіювання радіохвиль водою	10–40 дБ при сильних зливах	Ku, Ka, Q/V
Сніг	Поглинання (вологий), накопичення на антені	3–10 дБ, втрата спрямованості	Ku, Ka
Хмари	Поглинання через водяну пару	2–5 дБ	Ka, Q/V
Туман	Поглинання мікрокраплями	До 10 дБ	Ka
Сильний вітер	Порушення наведення антени	Втрата сигналу при зміщенні 0.1–0.2°	Всі вузькоспрямовані системи (VSAT, Ka)
Полярні умови	Іоносферні збурення + сніг/лід	Фейдинги, втрати пакета	L, S, C
Кліматичний фактор	Механізм впливу	Втрати та наслідки	Найбільш вразливі діапазони
Сонячні перешкоди	Сонце → прямий шум у приймач	До повного обриву 5–10 хв	C, Ku, Ka

Зміна клімату зробила стихійні лиха більш частими та серйозними. Ці лиха створюють значні виклики для служб реагування на надзвичайні ситуації, які повинні знаходити нові способи підготовки та реагування на ці події. Супутникове дистанційне зондування може надати детальні карти та дані, які допомагають службам реагування зрозуміти масштаби та наслідки стихійного лиха [28]. В умовах надзвичайних ситуацій, коли надійний зв'язок є критично важливим для координації рятувальних операцій, ці кліматичні перешкоди стають серйозною проблемою. Для мінімізації ризиків використовують резервні канали зв'язку

(наприклад, радіо, стільниковий зв'язок, якщо він доступний), а також більш стійке обладнання та відповідні протоколи зв'язку.

Табл.3.2

Механізми впливу на супутниковий зв’язок та наслідки зв’язку в надзвичайних ситуаціях

Фактор клімату	Механізм впливу на супутниковий зв’язок	Наслідки для зв’язку у надзвичайних ситуаціях
Сильні дощі, бурі, тайфуни	Атмосферна вода поглинає мікрохвильові сигнали (особливо Ku- і Ka-діапазон).	Ослаблення сигналу, підвищення ймовірності втрат пакетів, зниження пропускної здатності.
Фактор клімату	Механізм впливу на супутниковий зв’язок	Наслідки для зв’язку у надзвичайних ситуаціях
Сніг та крижаний дощ	Покриття антен льодом або снігом, поглинання та розсіювання сигналу.	Повна або часткова втрата сигналу, необхідність обігріву антен для підтримки роботи.
Сильний вітер та пилові бурі	Механічні коливання антен, підвищена запиленість атмосфери.	Дефокусування сигналу, можливі короткочасні перебої.
Грози та блискавки	Електричні розряди можуть створювати інтерференцію.	Тимчасові втрати сигналу, пошкодження наземного обладнання.

Продовження таблиці 3.2

Механізми впливу на супутниковий зв’язок та наслідки зв’язку в надзвичайних ситуаціях

Фактор клімату	Механізм впливу на супутниковий зв’язок	Наслідки для зв’язку у надзвичайних ситуаціях
Тропічні циклони / урагани	Комбінація сильного вітру, дощу та хвильового навантаження на наземні станції (якщо вони поблизу узбережжя).	Руйнування антен, повне припинення наземної частини зв’язку.
Висока температура та спека	Нагрів антенних елементів, зміна характеристик матеріалів.	Може знижувати ефективність передавачів і приймачів.
Сильне сонячне випромінювання / космічні бурі	Вплив на іоносферу, зміни електронної щільності.	Затримки сигналу, фазові зсуви, погіршення точності GPS.

Алгоритми та пристрої когерентного приймання займають ключове місце в теорії та практиці оптимальної обробки сигналів. Їх створили раніше, ніж інші оптимальні методи та приймачі, проте особливу увагу вони отримали завдяки здатності за певних умов забезпечувати найвищу можливу завадостійкість, недосяжну іншими способами. Суть когерентної обробки полягає в тому, що прийнята суміш сигналу й шуму порівнюється з еталонними зразками переданого сигналу, після чого вибирається той зразок, який має найменшу евклідову відстань до прийнятої суміші. Строго когерентне приймання можливе лише тоді, коли всі варіанти переданого сигналу відомі на вході демодулятора (тобто сигнал апріорно визначений) з точністю до інформаційного параметра. Якщо варіанти сигналу представлені відрізками гармонічних коливань із різними початковими фазами (наприклад, при ФМ чи ФРМ), то в ідеальному демодуляторі повинні зберігатися їхні зразки, які збігаються за частотою та фазою з прийнятими сигналами. Іншими словами, у приймачі формуються опорні коливання, когерентні з прийнятим сигналом. Саме тому такі системи називають когерентними приймачами або когерентними демодуляторами.

Серед когерентних методів (алгоритмів) трапляються як більш, так і менш ефективні з погляду завадостійкості, складності реалізації та інших характеристик. Сигнали з фазовою модуляцією (ФМ) можна приймати лише когерентним способом, тоді як сигнали з фазово-рейковою модуляцією (ФРМ) допускають використання різних методів обробки. Якщо початкову фазу прийнятих елементів сигналу відомо або її можна точно оцінити за попередньою історією процесу, то можуть застосовуватися як когерентні, так і некогерентні демодулятори. Водночас когерентний метод забезпечує вищу завадостійкість. Переваги когерентного демодулятора в таких умовах залежать від кратності модуляції, розмірності (кількості елементів) оброблюваного фрагмента сигналу та інших чинників. Втрата завадостійкості оптимального некогерентного приймання порівняно з когерентним зростає зі збільшенням позиційності та розмірності сигналу. Обираючи позиційність сигналів із ФМ або ФРМ, слід враховувати, що підвищення швидкості передавання інформації за рахунок збільшення кількості фазових позицій швидко знижує завадостійкість. Водночас за однакової інформаційної швидкості перехід від однопозиційної до двопозиційної ФМ (ФРМ) дає змогу вдвічі звузити смугу частот без шкоди для завадостійкості.

Перехід до трьох позицій за збереження тієї ж швидкості призводить до певного зниження завадостійкості, оскільки зменшення мінімального фазового зсуву не компенсується подовженням посилки. Однак подовження посилки зменшує міжсимвольну інтерференцію, що дозволяє застосовувати восьмипозиційні системи. Подальше збільшення кількості позицій для досягнення вищих швидкостей потребує використання комбінованих амплітудно-фазових методів модуляції. Під час приймання багатопозиційних сигналів із ФРМ та АФРМ переваги когерентного приймання стають особливо суттєвими. В усіх випадках ефективна реалізація когерентної обробки можлива лише за умови, що початкова фаза сигналу в каналі є сталою та достатньо повільно змінною, аби її можна було точніше оцінити, ніж інформаційну фазу.

Когерентний прийом суттєво підвищує завадостійкість супутникового сигналу під час несприятливих погодних умов (дощ, сніг, туман, граду, хмарність).

Синхронізація фази підсилює здатність «розпізнати» сигнал у шумі. При когерентному прийомі приймач відновлює опорну фазу та частоту сигналу, що надходить зі супутника. Це дозволяє декодеру розпізнавати навіть дуже ослаблені або зашумлені сигнали, а також виконувати фазову демодуляцію з майже повною компенсацією шумів. Вплив клімату впливає на Рс/Рш, цей вплив зменшує Рс/Рш, але застосування когерентного прийому дозволяє, щоб Рс/Рш не збільшувались. Когерентний прийом суттєво покращує співвідношення Рс/Рш (потужність сигналу до потужності шуму) у супутниковому зв'язку, особливо коли є погодні завади — дощ, сніг, град, хмари, турбулентність атмосфери тощо. Когерентний прийом відновлює опорну фазу, тому навіть при фазових спотвореннях приймач синхронізується з реальною фазою сигналу.

Це дає меншу помилку виявлення та збільшує ефективне Рс/Рш порівняно з некогерентним прийомом. Когерентний прийом базується на добутковому детектуванні - сигнал множать на точну копію опорної несучої (по частоті й фазі). Це дозволяє накопичувати енергію сигналу на тривалості символу, а шум накопичується слабше. Тому:

$$Pc/Pш(\text{когерентний}) > Pc/Pш(\text{некогерентний}) \quad (24)$$

Атмосферні опади викликають амплітудне затухання (Rain Fade) та погіршення SNR через додатковий шум. Когерентне виявлення дає змогу точніше відрізняти корисну фазову інформацію навіть при ослабленій амплітуді, тому помилки виявлення нижчі. В умовах затухання когерентний прийом дозволяє надійно застосовувати QPSK, 8PSK, 16APSK / 32APSK (у DVB-S2/S2X), які критичні до фазової помилки. Без когерентного прийому високі порядки модуляції просто не працювали б під дощем чи снігом — Рс/Рш впав би нижче порогу.

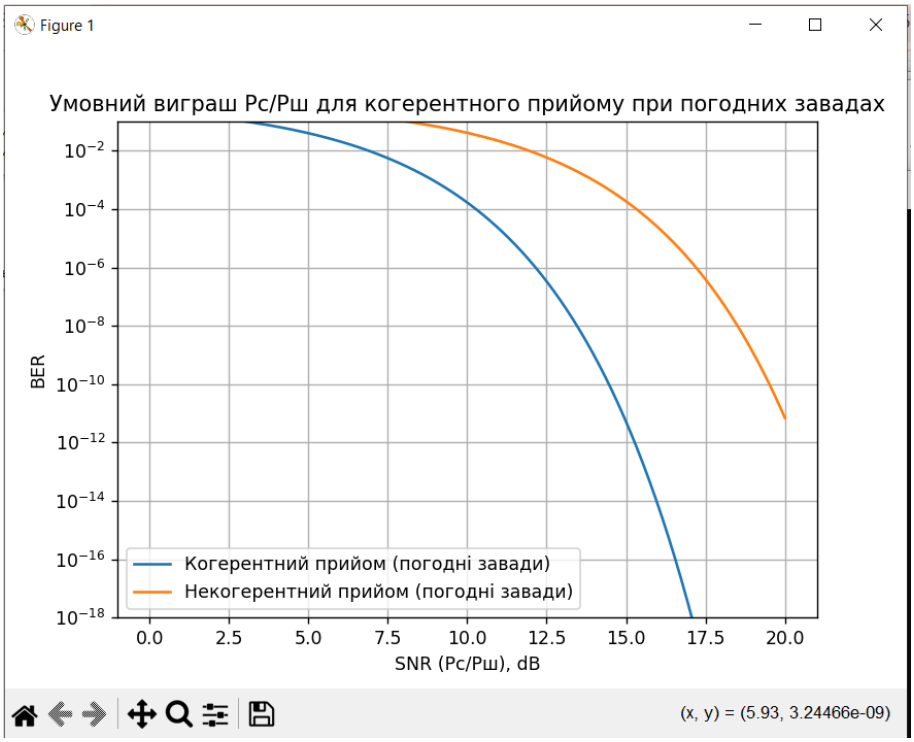


Рис.3.7 Умовний виграш у Pc/Pш (SNR)

На рис.3.7 показано умовний виграш у Pc/Pш (SNR) для когерентного прийому порівняно з некогерентним при тих самих погодних завадах — у діапазоні дуже малих імовірностей помилки аж до 10^{-18}. Як видно когерентний прийом досягає BER = 10^{-15} уже приблизно при ~14–15 дБ, а некогерентний прийом для цієї ж BER потребує ~19–20 дБ, тобто умовний виграш складає ≈ 4–5 дБ, що характерно для супутникових систем у дощових і сніжних умовах.

Когерентний прийом покращує супутниковий зв'язок під час поганих погодних умов, тому що він точно відновлює фазу сигналу, коригує частотні спотворення та зменшує вплив шуму, який з'являється під час дощу, снігу, хмарності чи туману. Також когерентний прийом покращує Pc/Pш у супутниковому зв'язку під дією погодних завад, тому що він точно відновлює фазу сигналу, дозволяє застосовувати кореляційний детектор і компенсує фазові спотворення каналу, що значно підвищує ефективний SNR і зменшує імовірність помилки.

Залежність ймовірності помилки Рпом від відношення сигнал/шум Pc/Pш (або SNR) є фундаментальною для супутникового та будь-якого цифрового зв'язку.

Чим вища енергія сигналу відносно шуму, тим менша імовірність помилки при виявленні символів або бітів.

Для будь-якої цифрової модуляції в каналі з шумом діє базовий принцип:

$$Pпом = f\left(\frac{Pс}{Pш}\right), \tag{25}$$

тобто чим більше відношення сигнал/шум, тим менше ймовірність помилки. У звичайних умовах ця залежність експоненційна: підвищуємо SNR на 3 дБ → BER зменшується приблизно у 10 разів; підвищуємо на 6 дБ → BER падає у ~100 разів.

Погодні умови вносять додаткове затухання, додатковий шум та фазові спотворення. Це змінює ефективний SNR:

$$\left(\frac{Pс}{Pш}\right)_{еф} = \frac{Pс - Lпогода}{Pш - Nатм} \tag{26}$$

де Lпогода — додаткове затухання (дощ, сніг); Nатм — додатковий атмосферний шум.

У результаті крива BER vs SNR зсувається вправо, тобто щоб отримати той самий BER, потрібно більше SNR, вигин кривої залишається подібним, зв'язок стає «чутливішим» до флуктуацій.

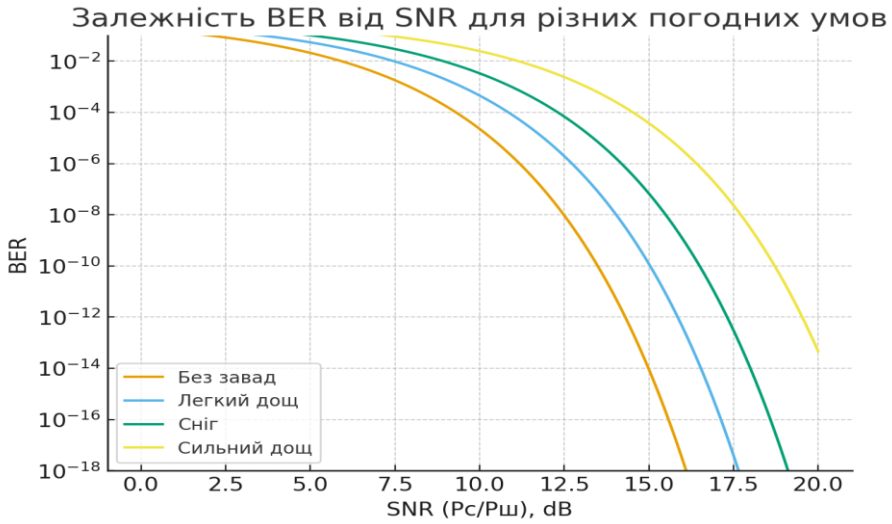


Рис.3.8 Графік залежності BER від SNR для кількох погодних умов

ВИСНОВКИ

У першому розділи розглянуто, що супутниковий зв’язок становить ключовий елемент сучасної телекомунікаційної інфраструктури, адже забезпечує передачу даних на великі відстані, мовлення, навігацію та глобальне підключення. Традиційно для низькошвидкісного космічного зв’язку застосовують радіочастотні системи, проте новітні досягнення у сфері FSO-технологій зробили їх перспективною альтернативою для високошвидкісної передачі даних. Для уникнення перешкод і забезпечення якісної комунікації супутникові системи працюють у визначених частотних діапазонах. Супутникові системи працюють у визначених частотних діапазонах, що дозволяє мінімізувати вплив перешкод і гарантувати стабільну та якісну пердачу сигналу. Також було розглянуто кілька видів систем супутникового зв’язку.

У другому розділі було представлено використання системи OFDM в супутниковому зв’язку та методи корекції помилок для надійності OFDM. OFDM-модуляція широко застосовується в сучасних системах передачі даних, зокрема в технологіях, що працюють через телефонні лінії (різні DSL-модеми), електромережі (стандарт HomePlug), а також у бездротових мережах (802.11a та 802.11g). Вона характеризується високою стійкістю до міжсимвольних завад (ISI) та імпульсних спотворень у часовій області. Крім того, у системах зі зворотним зв’язком можливо компенсувати частотні імпульсні спотворення (згасання каналу) шляхом виключення проблемних підканалів. Для підвищення надійності OFDM-систем застосовуються різні методи виправлення помилок. Серед них — кодування з прямою корекцією (FEC), перемежування та удосконалені схеми кодування, що дозволяють відновлювати дані, пошкоджені під час передачі. Завдяки цим підходам системи стають більш стійкими до впливу канальних спотворень, шумів і перешкод, що суттєво знижує рівень бітових помилок у складних умовах бездротового зв’язку.

У третьому розділі представлено, як різні погодні умови впливають на предачу супутникового сигналу та когерентний метод покращення передачі

сигналу. Використання високих частотних діапазонів забезпечує необхідну пропускну здатність для реалізації різних високошвидкісних сервісів передачі даних і зв’язку, зокрема широкосмугового доступу до Інтернету та прямого телемовлення. Водночас кліматичні фактори істотно впливають на роботу супутникових систем, особливо тих, що функціонують у діапазонах Ku, Ka та Q/V. Негативні погодні умови можуть спричиняти зниження якості сигналу, збільшення затримок, втрату кадрів або навіть повне припинення зв’язку. Когерентна обробка супутникового сигналу ґрунтується на порівнянні прийнятої суміші сигналу та шуму з еталонними зразками переданого сигналу, після чого обирається той варіант, що має найменшу евклідову відстань до прийнятого сигналу. Повністю когерентне приймання можливе лише за умови, що всі можливі реалізації переданого сигналу відомі демодулятору наперед (тобто сигнал визначений апріорно) з точністю до інформаційного параметра.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. State of the Art of Small Spacecraft Technology URL: https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/soa-communications/#9.2

2. Satellite Communication: Types, Architecture, Bands, and Applications URL: https://www.rfwireless-world.com/tutorials/satellite-communication-tutorial

3. Resilient communication model for satellite networks using clustering technique URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832021003690?utm

4. Catalog of Earth Satellite Orbits URL: https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog/page2.php

5. Applications of a LEO Satellite URL: https://dragonflyaerospace.com/what-are-some-applications-of-a-leo-satellite/

6. Medium Earth Orbit (MEO): An Overview URL: https://www.deepinsecurity.com/medium-earth-orbit/

7. Medium Earth Orbit (MEO) URL: https://spire.com/spirepedia/medium-earth-orbit-meo/#:~:text=MEO%20satellites%20are%20typically%20found%20between%202%2C000,visible%20from%20any%20given%20location%20on%20Earth**

8. Starlink: що це таке, як працює та хто зможе ним користуватися в Україні URL: https://ms.detector.media/it-kompanii/post/29166/2022-03-13-starlink-shcho-tse-take-yak-pratsyuie-ta-khto-zmozhe-nym-korystuvatysya-v-ukraini/

9. Inmarsat We enever beyond reachnsure you’re URL: https://spotme.ua/inmarsat-info?corporate=true

10. Inmarsat-4 F1, 2, 3 URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/inmarsat-4.htm

11. Thuraya Stay close URL: https://spotme.ua/thuraya-info?corporate=true#

12. Equation-Method for correcting clipping errors in OFDM signals URL: https://e-space.mmu.ac.uk/617339/1/Equation-Method%20for%20correcting%20clipping%20errors%20in%20OFDM%20signals.pdf

13. Турбо-код URL:

https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D1%80%D0%B1%D0%BE-%D0%BA%D0%BE%D0%B4?utm_source

14. Efficient coding techniques for flip-OFDM in IM/DD systems URL: https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering_and_technology/Computer_science/Turbo_codes/

15. Enhancing OFDM Performance with Turbo Coding Techniques URL: https://eureka.patsnap.com/report-enhancing-ofdm-performance-with-turbo-coding-techniques

16. Що таке стандарт для Ріда Соломона? URL: https://north.kukhnia.cx.ua/ukraincyam/shho-take-standart-dlya-rida-solomona.html

17. Reed-Solomon Code URL: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/reed-solomon-code

18. Згортковий код URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Convolutional_code

19. Comparative Performance Analysis of Block and Convolution Codes URL: https://www.researchgate.net/publication/279062525_Comparative_Performance_Analysis_of_Block_and_Convolution_Codes

20. Purpose of interleaving in OFDM systems URL: https://dsp.stackexchange.com/questions/24124/purpose-of-interleaving-in-ofdm-systems

21. https://ijettjournal.org/volume-9/number-7/IJETT-V9P267.pdf

22. Automatic repeat request URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_repeat_request

23. Automatic Repeat Request URL: https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/automatic-repeat-request

24. https://www.scirp.org/journal/paperinformationpaperid=57348#:~:text=Hybrid%20ARQ%20Error%20Control%20Schemes:%20There%20are,the%20error%20patterns%20which%20occur%20most%20frequently.

25. Fast ACM (Adaptive Coding and Modulation) URL: https://www.satexpander.com/fast-acm

26. Security Risks of Adaptive Coding and Modulation in Space Systems URL:

https://indico.esa.int/event/528/attachments/5988/10196/Security_Risks_of_Adaptive_Coding_and_Modulation_in_Space_Systems.pdf#:~:text=Abstract%E2%80%94Adaptive%20Coding%20and%20Modulation%20(ACM)%20space%20protocols,of%20physical%2Dlayer%20attackers%20targeting%20this%20uplink%20channel.

27. The impact of weather on Ka-band frequencies URL: https://room.eu.com/article/the-impact-of-weather-on-ka-band-frequencies?

28. Satellite-Aided Disaster Response URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2024AV001395

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ