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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Метод підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль»

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

(підпис) Віталій МИХАЙЛЕНКО
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-61
Віталій МИХАЙЛЕНКО

Керівник: Наталія РУДЕНКО

Рецензент: Артем Антоненко

Київ – 2024

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 РУДЕНКО
« » _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Михайленку Віталію Сергійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Метод підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль»,
керівник кваліфікаційної роботи Наталія РУДЕНКО, к.т.н., доцент,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 15.10.2024 р. №320.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Теорія радіохвиль.
   2. Відеокодеки H.264/H.265.
   3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Теоретичні основи розповсюдження радіохвиль у широкосмугових системах;
   2. Особливості широкосмугових безпроводових систем зв'язку;
   3. Методи підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

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	26.10.24	Викон.
2.	Теоретичні основи розповсюдження радіохвиль у широкосмугових системах	29.10.24	Викон.
3.	Особливості широкосмугових безпроводових систем зв'язку	01.12.24	Викон.
4.	Методи підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль	02.11.24	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	11.12.24	Викон.
6.	Розробка презентації	25.12.24	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Віталій МИХАЙЛЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Михайленка Віталія Сергійовича

на тему: «Метод підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль»

Актуальність:

Актуальність теми обумовлена необхідністю забезпечення ефективної передачі високоякісного відеоконтенту в сучасних широкосмугових системах. Використання теорії розповсюдження радіохвиль дозволяє оптимізувати покриття та мінімізувати втрати сигналу, що є важливим для стабільної роботи таких систем. Інтеграція з відеокодеками H.264/H.265 сприяє зменшенню обсягу даних без втрати якості, забезпечуючи високу продуктивність мереж і задоволення вимог сучасних користувачів.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показала 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. Доцільно додати приклади реальних застосувань частотних діапазонів для кожної галузі (наприклад, 2.4 ГГц для Wi-Fi, Ku-діапазон для супутникового зв'язку).
2. Потрібно уточнити методологію оцінки якості відеопотоків: які саме інструменти використовувалися для розрахунку PSNR, SSIM та VMAF, і за яких умов проводилися тести.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач Михайленко Віталій Сергійович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Рецензент: к.т.н., доцент Артем Литвиненко

(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 Михайленко В.С. 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: Метод підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

В.о. директора ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Михайленко Віталій Сергійович 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 Михайленка Віталія Сергійовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Михайленко В.С.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

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

" " _____ 2024 року

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 80 стор., 12 рис., 8 табл., 30 дж.

Мета роботи – дослідження методів підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

Об'єкт дослідження – процес передачі даних у безпроводових широкосмугових системах.

Предмет дослідження – методи підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

Короткий зміст роботи: У першому розділі досліджено теоретичні основи розповсюдження радіохвиль у широкосмугових системах. Проаналізовано властивості радіохвиль (відбиття, заломлення, дифракція, поглинання), їхній вплив на ефективність телекомунікаційних мереж та особливості частотних діапазонів у різних галузях. Підкреслено важливість оптимізації архітектури мереж для забезпечення якісного зв'язку в умовах перешкод.

У другому розділі запропоновано методи підвищення ефективності роботи широкосмугових систем на основі відеокодеків H.264/H.265. Вивчено можливості зменшення бітрейту без втрати якості, оптимізації використання мережевих ресурсів і зниження енергоспоживання. Встановлено, що ці методи сприяють покращенню якості відеозв'язку навіть в умовах обмеженої пропускної здатності.

У третьому розділі систематизовано методи оцінки якості відеопотоків, включаючи суб'єктивні, об'єктивні (PSNR, SSIM) і гібридні підходи (VMAF, SVM). Досліджено вплив бітових і пакетних помилок на якість відео, показано, що BER понад 10^{-3} і PER понад 5% значно знижують якість. Запропоновано використання FEC-кодів та адаптивного управління потоками для мінімізації цих впливів і забезпечення стабільного відеозв'язку в умовах нестабільних мереж.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТЕОРІЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ, H.264, H.265, MATLAB SIMULINK, ВІДЕОКОНТЕНТ.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 80 pages, 12 pictures, 8 table, 30 sources.

The purpose of the work is to study methods for increasing the efficiency of promising broadband systems based on the theory of radio wave propagation.

The object of the research is the process of data transmission in wireless broadband systems.

The subject of the research is methods for increasing the efficiency of promising broadband systems based on the theory of radio wave propagation.

Summary of the work: The first section studies the theoretical foundations of radio wave propagation in broadband systems. The properties of radio waves (reflection, refraction, diffraction, absorption) are analyzed, their impact on the efficiency of telecommunication networks and the features of frequency ranges in various industries. The importance of optimizing network architecture to ensure high-quality communication in conditions of interference is emphasized.

The second section proposes methods for increasing the efficiency of broadband systems based on H.264/H.265 video codecs. The possibilities of reducing the bitrate without losing quality, optimizing the use of network resources and reducing energy consumption are studied. It is established that these methods contribute to improving the quality of video communication even in conditions of limited bandwidth.

In the third section, methods for assessing the quality of video streams are systematized, including subjective, objective (PSNR, SSIM) and hybrid approaches (VMAF, SVM). The influence of bit and packet errors on video quality is studied, it is shown that BER over 10^{-3} and PER over 5% significantly reduce quality. The use of FEC codes and adaptive flow control is proposed to minimize these effects and ensure stable video communication in unstable networks.

KEYWORDS: RADIO WAVE PROPAGATION THEORY, H.264, H.265, MATLAB SIMULINK, VIDEO CONTENT.

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У ШИРОКОСМУГОВИХ СИСТЕМАХ 11
1.1. Роль радіохвиль в галузі телекомунікацій 11
1.2. Основи теорії розповсюдження радіохвиль 19
РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ШИРОКОСМУГОВИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ 28
2.1. Особливості широкосмугових безпроводових систем зв'язку та їх вимоги до розповсюдження сигналів 28
2.2. Методи підвищення ефективності роботи широкосмугових систем на основі відеокодеків H.264/H.265 39
2.3. Дослідження завадостійкості систем широкосмугових безпроводових систем за допомогою ПЗ Matlab Simulink 49
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПЕРСПЕКТИВНИХ ШИРОКОСМУГОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ 56
3.1. Методи оцінки якості потокового відео 56
3.2. Дослідження завадостійкості систем широкосмугових безпроводових систем за допомогою ПЗ Matlab Simulink 68
ВИСНОВКИ 79
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 81
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 85

ВСТУП

З розвитком телекомунікаційних технологій широкосмугові системи відіграють вирішальну роль у забезпеченні швидкого та надійного зв'язку. Завдяки своїй здатності підтримувати високі швидкості передачі даних та обробляти великі обсяги трафіку, широкосмугові системи використовуються в різних сферах, включаючи мобільний зв'язок, інтернет речей (IoT), супутникові комунікації та інші галузі. Однак для досягнення максимальної ефективності таких систем необхідно ретельно вивчати вплив навколишнього середовища на розповсюдження радіохвиль, оскільки це безпосередньо впливає на якість сигналу та стабільність з'єднання.

Теорія розповсюдження радіохвиль дозволяє моделювати і аналізувати, як радіохвилі поширюються в різних середовищах, враховуючи перешкоди, відбиття, дифракцію та інші фактори. Це має особливе значення для перспективних широкосмугових систем, які використовують високочастотні діапазони, такі як міліметрові хвилі, що є чутливими до умов довкілля. Тому глибоке розуміння теорії розповсюдження радіохвиль є ключовим фактором у забезпеченні надійності та ефективності роботи широкосмугових систем.

У сучасному світі, де передача відеоконтенту через широкосмугові системи займає ключову роль у телекомунікаціях, стрімкому поширенню технологій онлайн-відео, потокових сервісів, відеоконференцій та інших мультимедійних додатків сприяє використання ефективних відеокодеків. Кодеки H.264 (AVC) та H.265 (HEVC) забезпечують значний прогрес у стисненні відео, що суттєво впливає на ефективність роботи широкосмугових систем. Їхня актуальність обумовлена такими факторами:

1. Зменшення необхідної пропускної здатності. Кодеки H.264 і H.265 дозволяють передавати високоякісний відеоконтент із меншим бітрейтом. Наприклад, H.265 забезпечує до 50% більш ефективне стиснення, ніж H.264, що знижує вимоги до пропускної здатності мережі.

2. Покращення якості відео при низьких бітрейтах. Використання H.265 забезпечує високу якість відео навіть при низьких бітрейтах, що особливо важливо для мобільних та супутникових систем, де пропускна здатність обмежена.

3. Зменшення затримок у передачі даних. Завдяки ефективному стисненню, кодеки зменшують обсяг переданих даних, що дозволяє мінімізувати затримки в реальному часі, наприклад, у відеоконференціях або потоковому відео.

4. Економія ресурсів зберігання. Зменшення розмірів відеофайлів дозволяє значно скоротити потреби у сховищах даних, що важливо для систем відеоспостереження, хмарних сервісів та архівів.

5. Підтримка UHD і 4K/8K відео. Кодек H.265 спеціально розроблений для обробки відео з високою роздільною здатністю, що робить його критично важливим для сучасних і майбутніх мультимедійних додатків.

Актуальність використання кодеків H.264 і H.265 у широкосмугових системах зумовлена необхідністю забезпечення високої якості відео при обмежених мережевих ресурсах. Їх застосування дозволяє значно підвищити ефективність передачі, скоротити витрати на зберігання даних і підтримувати сучасні стандарти відео, що робить їх невід'ємною частиною розвитку телекомунікаційних технологій.

Метою цієї роботи є дослідження ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль. У рамках дослідження будуть проаналізовані існуючі моделі поширення радіохвиль у різних середовищах, вивчені їхні впливи на продуктивність широкосмугових систем, а також запропоновані нові підходи до оптимізації передачі сигналів у складних умовах для забезпечення стабільної і якісної роботи систем.

Мета роботи – дослідження методів підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

Об'єкт дослідження – процес передачі даних у безпроводових широкосмугових системах.

Предмет дослідження – методи підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У ШИРОКОСМУГОВИХ СИСТЕМАХ

1.1. Роль радіохвиль в галузі телекомунікацій

Радіохвилі – це вид електромагнітних хвиль, які використовуються для передачі інформації через простір без використання фізичних провідників. Вони є частиною електромагнітного спектра і займають частотний діапазон від приблизно 3 Гц до 300 ГГц, хоча в основному для телекомунікацій застосовуються хвилі з частотою від кількох кілогерц до кількох десятків гігагерц.

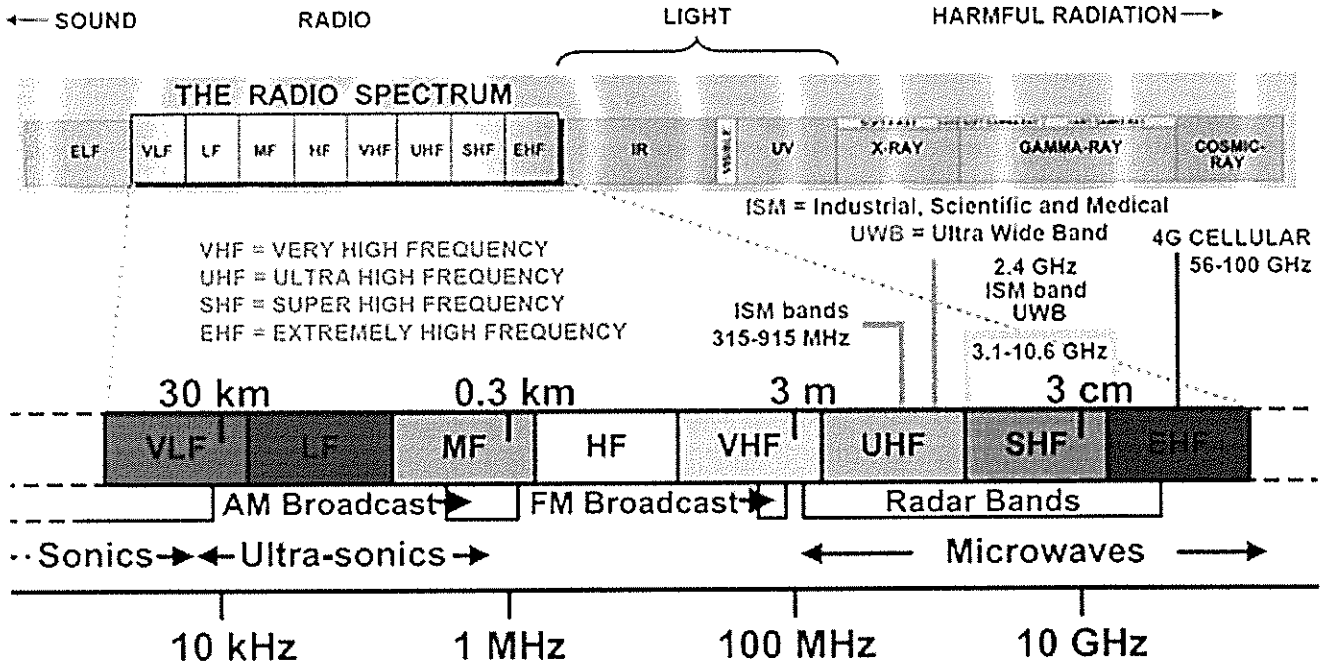


Рис. 1.1. Радіочастотний спектр

Основні властивості радіохвиль:

1. Довжина хвилі: Радіохвилі мають довгі хвилі в порівнянні з іншими типами електромагнітного випромінювання, такими як інфрачервоне випромінювання чи видиме світло. Довжина хвилі радіохвиль коливається від кількох міліметрів до кількох кілометрів залежно від їхньої частоти.

2. Частота: Частота радіохвиль обернено пропорційна їхній довжині. Чим вища частота, тим менша довжина хвилі. Радіохвилі використовуються у різних частотних діапазонах для різних застосувань, включаючи AM і FM радіо, телебачення, мобільний зв'язок, Wi-Fi тощо.

3. Проникнення через перешкоди: Радіохвилі можуть проникати через деякі матеріали, хоча їхня здатність проникнення залежить від частоти. Наприклад, низькочастотні радіохвилі можуть краще проходити крізь будівлі, тоді як високочастотні хвилі частіше відбиваються або поглинаються.

4. Розсіювання та відбиття: Радіохвилі можуть відбиватись від поверхонь (наприклад, від будівель або землі) та розсіюватись на об'єктах, менших за довжину хвилі, що може призводити до багатопроменевих ефектів і зміни якості зв'язку.

Використання радіохвиль у телекомунікаціях:

Радіохвилі є основним засобом передачі інформації в безпроводових технологіях (табл. 1.1), таких як:

- Мобільний зв’язок (2G, 3G, 4G, 5G), де різні частотні діапазони забезпечують з'єднання на коротких і великих відстанях;
- Супутниковий зв’язок, який дозволяє передачу сигналу через величезні відстані, охоплюючи майже всю земну кулю;
- Радіомовлення (AM та FM), що дозволяє передавати звукову інформацію на великі відстані;
- Wi-Fi та Bluetooth, які забезпечують локальний зв'язок на коротких відстанях для обміну даними між пристроями;
- Радіолокація, де радіохвилі використовуються для виявлення об'єктів, їхнього розташування та швидкості.

Принцип роботи радіохвиль:

Для передачі інформації через радіохвилі використовуються процеси модуляції, коли сигнали, що містять дані (звук, зображення, текст), накладаються на радіохвилю. Основні методи модуляції:

- Амплітудна модуляція (AM): змінює амплітуду радіохвилі відповідно до інформації.

- Частотна модуляція (FM): змінює частоту хвилі для передачі інформації.
- Фазова модуляція (PM): змінює фазу хвилі відповідно до даних, що передаються.

Таблиця 1.1.

Частотні діапазони радіохвиль та їх використання

Діапазон	Частота	Довжина хвилі	Застосування
LF	30 - 300 кГц	1 000 - 10 000 м	Навігація, морські комунікації
MF	300 кГц - 3 МГц	100 - 1 000 м	AM-радіомовлення, навігація
HF	3 - 30 МГц	10 - 100 м	Короткохвильове радіо, військовий зв'язок
VHF	30 - 300 МГц	1 - 10 м	FM-радіо, телебачення, авіаційний зв'язок
UHF	300 МГц - 3 ГГц	0,1 - 1 м	Мобільний зв'язок, Wi-Fi, телебачення
SHF	3 - 30 ГГц	1 - 10 см	5G, супутниковий зв'язок, мікрохвилі
EHF	30 - 300 ГГц	1 - 10 мм	Міліметрові хвилі для 5G, радіолокація

У галузі телекомунікацій використовуються різні частотні діапазони, кожен із яких має свої характеристики та застосування:

1. Низькочастотний діапазон (LF)

Частоти: 30 - 300 кГц

Довжина хвилі: 1 000 - 10 000 м

Застосування: Навігація, радіомовлення на великих відстанях, особливо для морських комунікацій, де хвилі можуть поширюватися на великі відстані завдяки здатності огинати перешкоди.

2. Середньочастотний діапазон (MF)

Частоти: 300 кГц - 3 МГц

Довжина хвилі: 100 - 1 000 м

Застосування: АМ-радіомовлення, навігаційні сигнали. Завдяки середній довжині хвилі можуть поширюватися на великі відстані та огинати перешкоди.

3. Високочастотний діапазон (HF)

Частоти: 3 - 30 МГц

Довжина хвилі: 10 - 100 м

Застосування: Короткохвильове радіо, міжнародні комунікації, військовий зв'язок. Хвилі цього діапазону можуть відбиватися від іоносфери, що дозволяє здійснювати зв’язок на великі відстані.

4. Дуже високочастотний діапазон (VHF)

Частоти: 30 - 300 МГц

Довжина хвилі: 1 - 10 м

Застосування: FM-радіо, телебачення, мобільний зв'язок, авіаційний зв'язок. Цей діапазон забезпечує хорошу якість зв’язку на середні відстані.

5. Ультрависокочастотний діапазон (UHF)

Частоти: 300 МГц - 3 ГГц

Довжина хвилі: 0,1 - 1 м

Застосування: Телебачення, мобільний зв'язок (2G, 3G, 4G), Wi-Fi, Bluetooth, радіолокація. UHF-хвилі дозволяють передавати великі обсяги даних, але мають обмежене покриття.

6. Надвисокочастотний діапазон (SHF)

Частоти: 3 - 30 ГГц

Довжина хвилі: 1 - 10 см

Застосування: 5G, супутниковий зв'язок, Wi-Fi (5 ГГц), мікрохвильові системи. SHF-хвилі можуть передавати великі обсяги даних на короткі відстані, але легко поглинаються перешкодами (будівлями, деревами).

7. Екстрависокочастотний діапазон (EHF)

Частоти: 30 - 300 ГГц

Довжина хвилі: 1 - 10 мм

Застосування: Міліметрові хвилі для 5G, системи радіолокації, технології майбутнього (наприклад, 6G), системи бездротової передачі даних на надзвичайно високих швидкостях. Екстрависокочастотні хвилі мають дуже обмежене покриття та потребують прямої видимості між передавачем і приймачем.

Радіохвилі створили основу для розвитку сучасних телекомунікаційних систем, завдяки яким стало можливим передавати інформацію на великі відстані, забезпечувати зв'язок у реальному часі та розвивати нові технології, такі як Інтернет речей (IoT), мобільний зв'язок і супутникові системи. Вони дозволяють здійснювати зв'язок у важкодоступних регіонах і забезпечувати мобільність користувачів, що є ключовими перевагами у сучасному світі.

Радіохвилі випускаються як елемент електромагнітних хвиль з довжиною хвилі, що перевищує приблизно 1 мм, що відповідає частоті нижче 300 ГГц [1]. Ці хвилі, як і всі електромагнітні хвилі, мають унікальні характеристики, які розпочинають їхню здатність передавати інформацію. Радіохвилі можуть проходити через різні матеріали, що робить їх ідеальними для використання в телекомунікаціях. Наприклад, вони легко можуть проходити через стіни та інші перешкоди, що забезпечують стабільність сигналу в умовах, коли фізичні бар'єри можуть заважати передачі [2]. Це особливо важливо в сучасних системах зв'язку, денадійність і якість сигналу критично важливо.

Частота та довжина хвилі є двома основними характеристиками радіохвиль, які впливають на їх використання в телекомунікаціях. Як правило, з підвищенням частоти довжина хвилі зменшується [2]. Це означає, що хвилі з високою частотою можуть краще проходити через перешкоди, тоді як хвилі з низькою частотою можуть покривати більшу відстань. Наприклад, радіохвилі з частотою 2,4 ГГц часто використовують у бездротових мережах Wi-Fi, тому вони забезпечують хорошу пропускну здатність і проникають через стіни, у той час як більші частоти, такі як 5 ГГц, можуть забезпечити вищу швидкість, але з меншим радіусом дії [3]. Розуміння цих характеристик є критичним для проектування ефективних систем зв'язку.

Існує кілька видів радіохвиль, що використовуються в телекомунікаціях, кожен з яких має свої особливості та застосування [4]. Наприклад, низькочастотні хвилі (LF) використовують для радіомовлення на великій відстані, тоді як високочастотні хвилі (HF) і ультрависокочастотні хвилі (VHF) часто використовують для зв'язку в морських і авіаційних системах. Крім того, мікрохвилі, які будуть мати більшу частоту, використовуються в мобільних телефонах і супутникових комунікаціях [1]. Кожен із цих типів радіохвиль має свої переваги та недоліки, що робить їх підхідними для різних видів передачі даних у сучасних телекомунікаційних системах.

Історія розвитку радіохвиль у телекомунікаціях

Розвиток радіохвиль у телекомунікаціях почався з ранніх експериментів та відкриттів, які заклали основу для сучасних технологій зв'язку [1]. Одним із перших значущих етапів стало використання радіохвиля для безпровідного зв’язку, яке вперше здійснив О. Попов між 1895 і 1899 роками [1]. Ці експерименти лише продемонстрували можливості передачі інформації на відстані, але привели до подальшого розвитку радіотехнологій. Важливим моментом стало вивчення електромагнітних хвиль, що дозволило розширити частотний діапазон радіохвиль, які могли бути створені для передачі сигналів [5]. Це стало основою для подальших досягнень у сфері телекомунікацій.

З часом технології радіозв'язку еволюціонували, впливаючи на всі аспекти зв'язку та комунікацій [6]. З 1980-х років почалися активні дослідження кодованих сигналів, які дозволили вивчити тонку структуру нижнього іоносфери [7]. Ці технології відкрили нові можливості для передачі інформації на великих відстанях, що стало кількістю для розвитку телекомунікаційних систем. Вони включали в себе не лише вдосконалення радіочастотних структур, але й інтеграцію нових технологій, які покращили якість та швидкість зв’язку [8]. Завдяки цим змінам радіозв'язок став більш надійним і доступним.

Ключовими інноваціями, що сформували сучасні телекомунікації, стали різноманітні цифрові системи та технології обробки даних [6]. Серед них важливо відзначити розвиток мобільних радіозв'язкових систем, які змінили спосіб, яким

люди обмінювалися [9]. Сучасні технології забезпечують високу швидкість передачі даних та надійних зв'язків, що робить їх невід'ємною частиною повсюдного життя. Завдяки цим інноваціям телекомунікації стали більш інтерактивними та доступними для широкого загалу, що сприяло інформаційній революції в суспільстві [10].

Як радіохвилі полегшують спілкування

Передача сигналів через радіохвилі є основою сучасних телекомунікацій [3]. Коли високочастотний змінний струм проходить через провідники, він також випромінює радіохвиль [3]. Ці хвилі перетворюються на електромагнітні хвилі за допомогою антени, яка є функцією передачі інформації на велику відстань [5]. Основи поширення радіохвиль враховують різноманітні фактори, включаючи атмосферні умови та рельєф місцевості [11]. Завдяки унікальним властивостям, радіохвилі можуть ефективно проходити через різні перешкоди, що робить їх ідеальними для використання в різних системах зв'язку.

Важливу роль у передачі інформації через радіохвилі виконують методи модуляції [3]. Існує три основних типи модуляції: амплітудна модуляція (AM), частотна модуляція (FM) та кутова модуляція [3]. Ці методи дозволяють змінювати характеристики радіосигналу, що забезпечує його ефективну передачу і прийом. Наприклад, частотна модуляція забезпечує високу якість звуку та стійкість до перешкод, що робить її популярною в радіомовленні та мобільних зв'язках. Завдяки цим методам інформація може передаватися з максимальною точністю і надійністю, що є критично успішним для успішної роботи телекомунікаційних систем.

Типи систем зв'язку, що виконують радіохвилі, є різноманітними й охоплюють широкий спектр програм [11]. Наприклад, мобільні телефони, радіотелефони, радіо і бездротові мережі є прикладами, де радіохвилі забезпечують безперервний зв'язок [12]. Ці системи можуть бути реалізовані через лінійні або безлімітні передачі, залежно від конкретних потреб користувачів [5]. Крім того, радіохвилі використовують не тільки для зв'язку, але й для навігації, вивчення космічних об'єктів та моніторингу навколишнього середовища [1]. Завдяки своїй

універсальності, радіохвилі залишаються критично важливими для розвитку та вдосконалення телекомунікаційних технологій.

Застосування радіохвиль у сучасних телекомунікаціях

Мережі мобільного зв'язку та бездротовий зв'язок змінили ландшафт телекомунікацій, дозволяючи користувачам безперешкодно підключатися практично з будь-якого місця [13]. Розповсюдження мобільної телефонії перевершило поширення традиційних стаціонарних абонентів, підкреслюючи перехід до мобільного зв'язку [14]. Ці мобільні мережі працюють на принципах передачі радіохвиль, що забезпечує обмін голосом і даними на великі відстані. Побудова та організація цих систем мобільного радіозв'язку базуються на ключових теоретичних концепціях, що забезпечують надійне та ефективне підключення [9]. У результаті мобільний зв'язок відіграє вирішальну роль у розвитку бізнесу та економіки, сприяючи миттєвому спілкуванню та обміну даними між клієнтами та підприємствами [15].

Супутникові системи зв'язку являють собою ще одне важливе застосування радіохвиль у сучасних телекомунікаціях [16]. З 1960-х років використання штучних супутників революціонізувало наш спосіб спілкування на великих відстанях. Ці системи покладаються на поширення радіохвиль для передачі сигналів між Землею та супутниками на орбіті, що забезпечує глобальне покриття та підключення. Побудова та експлуатація систем супутникового зв'язку потребує розуміння специфічних діапазонів радіочастот та унікальних проблем, пов'язаних із передачею супутникового сигналу [17]. Завдяки використанню цих передових технологій супутниковий зв'язок забезпечив широкий спектр застосувань, включаючи телевізійне мовлення, Інтернет-послуги та системи екстреного зв'язку, тим самим покращуючи глобальне підключення.

Окрім мобільного та супутникового зв'язку, радіохвилі є фундаментальними для функціонування Інтернету та технологій Wi-Fi [14]. Мережі Wi-Fi використовують радіочастоти, щоб дозволити пристроям підключатися до Інтернету бездротовим способом, що полегшує передачу даних без громіздких кабелів. Ефективність технології Wi-Fi додатково підвищується завдяки її

здатності обробляти кілька з'єднань одночасно, дозволяючи користувачам безперебійно обмінюватися даними між пристроями [18]. Ця інновація не лише підтримує такі повсякденні дії, як перегляд веб-сторінок і потокове передавання, але також відіграє життєво важливу роль у розвитку технологій розумного дому та міжмашинного зв'язку, які стають все більш поширеними в нашому підключеному світі [2]. Постійний прогрес у технології Wi-Fi продовжує розширювати можливості бездротового зв'язку, роблячи його важливим компонентом сучасних телекомунікацій.

1.2. Основи теорії розповсюдження радіохвиль

Основи теорії розповсюдження радіохвиль є ключовим напрямом у вивченні роботи безпроводових систем зв'язку, телекомунікаційних мереж, радіомовлення та інших технологій, що використовують радіохвилі для передачі інформації. Основи цієї теорії охоплюють вивчення закономірностей поширення радіохвиль у різних середовищах, взаємодію радіохвиль із перешкодами, їх відбиття, заломлення, дифракцію, а також поглинання і розсіювання у різних матеріалах. Теорія розповсюдження радіохвиль залишається основою для створення сучасних безпроводових мереж і дозволяє вирішувати низку практичних завдань, таких як забезпечення безперервного зв'язку, оптимізація покриття, мінімізація впливу перешкод, та забезпечення надійності телекомунікаційних систем.

Основні властивості теорії розповсюдження радіохвиль (рис. 1.2):

1. Прямолінійне поширення радіохвиль: Це властивість є базовою для високочастотних хвиль, що мають тенденцію поширюватися по прямій лінії та є найбільш придатними для лінійної видимості (LOS — Line of Sight) з'єднань.

2. Відбиття та заломлення: При зустрічі з перешкодами, радіохвилі можуть відбиватись або заломлюватися. Ці ефекти важливі для побудови мереж у міських умовах, де є багато будівель та інших об'єктів.
3. Дифракція: Дозволяє радіохвилям огинати перешкоди, що є важливим у випадках, коли між передавачем і приймачем є фізичні об'єкти. Дифракція суттєво впливає на покриття сигналом та забезпечення безперервності зв'язку.
4. Поглинання: Радіохвилі втрачають енергію при проходженні через матеріали (наприклад, будівлі, рослинність), що особливо помітно на високих частотах.
5. Розсіювання: Спричинене малими перешкодами, які менші за довжину хвилі, і створює додаткові канали, які дозволяють сигналу досягти приймача непрямими шляхами.

Важливість теорії розповсюдження радіохвиль:

- Оптимізація мережевої архітектури: Вивчення основних закономірностей поширення дозволяє коректно проектувати мережі для покращення покриття та якості зв'язку.
- Підвищення ефективності безпроводових систем: Знання про розповсюдження хвиль допомагає краще налаштовувати системи, такі як Wi-Fi, LTE, 5G, особливо в умовах міського середовища з високою щільністю перешкод.
- Визначення потужності передавачів: Розуміння того, як хвилі втрачають енергію на шляху до приймача, дозволяє оптимально налаштувати потужність передавачів, що економить енергію та зменшує завади.

Прямолінійне поширення радіохвиль

Прямолінійне поширення радіохвиль залежить від частоти сигналу. Високочастотні радіохвилі традиційно поширюються прямолінійно і потребують прямої видимості між передавачем і приймачем [1]. Це означає, що для успішної передачі даних необхідно, щоб між ними не було перешкод, таких як будівництво або дерево. У цьому протилежності, низькочастотні радіохвилі можуть покрити значно більший відступ з меншими втратами, потім вони здатні огинати перешкоди

і поширюватися через різні матеріали [2]. Це робить їх ідеальними для використання в умовах, де пряма видимість не може бути забезпечена, наприклад, у міських районах або гірських місцевостях.

Таблиця 1.2.

Основні аспекти теорії розповсюдження радіохвиль

Показник	Опис	Формула
Прямолінійне поширення радіохвиль	Властивість високочастотних хвиль поширюватись по прямій лінії, найбільш придатні для лінійної видимості (LOS).	$P_r = P_t * (\lambda / (4\pi d))^2$
Відбиття та заломлення	При зустрічі з перешкодами радіохвилі можуть відбиватися або заломлюватися. Важливо для побудови мереж у міських умовах.	$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2)$
Дифракція	Радіохвилі можуть огинати перешкоди. Важливо для забезпечення покриття сигналом за фізичних об'єктів між передавачем і приймачем.	$L_d = 6.9 + 20 * \log(\sqrt{((v - 0.1)^2 + 1)} + v - 0.1)$
Поглинання	Радіохвилі втрачають енергію при проходженні через матеріали. Особливо помітно на високих частотах.	$FSPL(dB) = 20 * \log(d) + 20 * \log(f) - 147.55$
Розсіювання	Спричинене малими перешкодами, які менші за довжину хвилі, що створює додаткові шляхи до приймача.	$Intensity \propto 1 / \lambda^4$

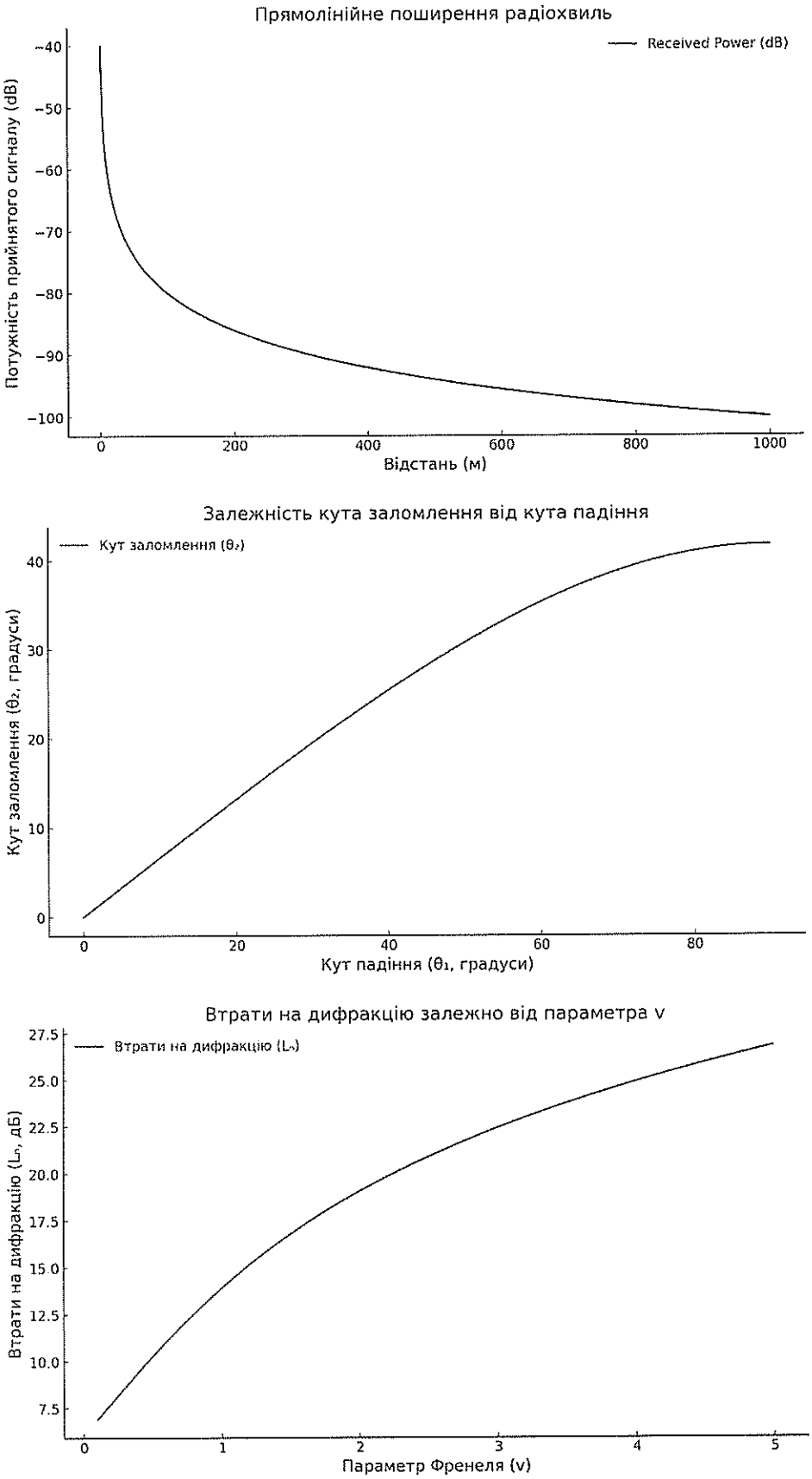


Рис. 1.2. Показники теорії розповсюдження радіохвиль

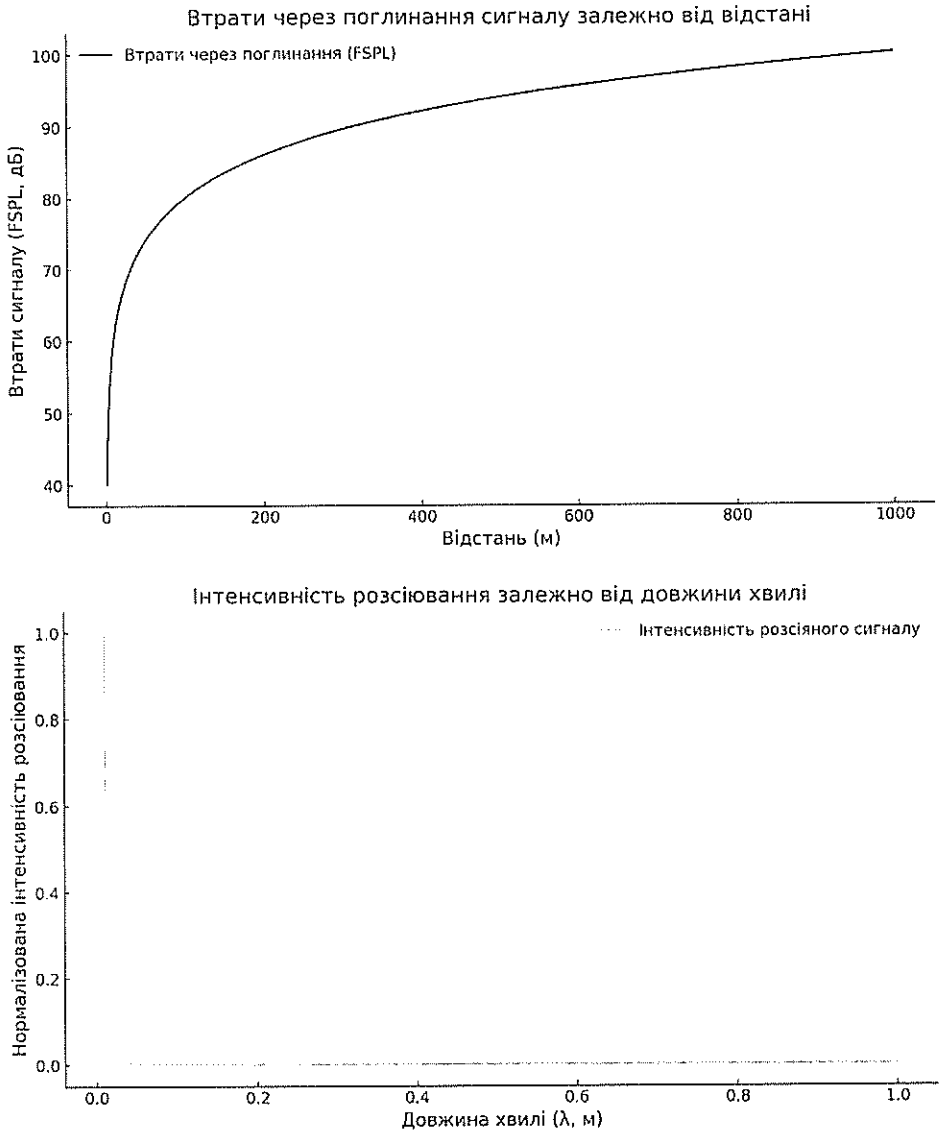


Рис. 1.3. Показники теорії розповсюдження радіохвиль

Атмосферні умови також впливають на важливу роль у прямолінійному розширеному радіохвилі. Деякі атмосферні явища, такі як дощ і туман, можуть негативно вплинути на якість сигналу, особливо на високих частотах [3]. Наприклад, дощ може зменшити силу сигналу до 30 дБ або більше, що робить його практично непридатним для зв'язку [2]. Такі зміни в атмосфері можуть призвести до значних втрат сигналу, що знижує ефективність передачі даних та вимагає використання додаткових технологій для компенсації цих втрат.

Обмеження відстані є ще критичним аспектом прямолінійного поширення радіохвиль. Зазначено, що поширення у прямій видимості обмежене кривизною Землі [1]. Це означає, що радіосигнали можуть досягти лише певної відстані до тих

пір, поки між передавачем і приймачем не виникнуть перешкоди, пов'язані з формою Землі. Для подолання великих відстаней, де пряма видимість недоступна, потрібні ретранслятори або підсилювачі сигналу, що дозволяє забезпечити стабільний зв'язок [2]. Таким чином, зрозуміло, що для ефективної роботи радіозв'язку необхідно використовувати як частоту, так і атмосферні умови.

Відбиття та заломлення

Залежність відбиття радіохвилі від залучених матеріалів є вирішальним аспектом розуміння поширення радіохвиль [1]. Зокрема, на силу відбиття істотно впливають властивості поверхні матеріалів, з якими стикаються хвилі. Наприклад, відомо, що металеві поверхні дуже ефективно відбивають сигнали, створюючи сильний зворотний сигнал [2]. Це явище може призвести до утворення радіотіні за перешкодами, куди радіохвилі не досягають через відбиття. Крім того, характеристики поверхні, що відбиває, такі як текстура та провідність, також відіграють ключову роль у визначенні того, скільки сигналу відбивається та поглинається. Розуміння цих властивостей матеріалу має важливе значення для оптимізації систем зв'язку, особливо в міських умовах, де будівлі та інші споруди можуть значно впливати на якість сигналу.

Перешкоди, викликані відбитими сигналами, є ще одним критичним фактором у поширенні радіохвиль [3]. Коли радіохвилі відбиваються від поверхонь, вони можуть заважати основному сигналу, що призводить до явища, відомого як багатопроменєве поширення. Ці перешкоди можуть призвести до коливань якості та надійності сигналу, особливо в місцях із великою кількістю відбивних поверхонь, наприклад у містах. Конструктивні та деструктивні інтерференційні моделі, створені цими відбитими хвилями, можуть підвищити або погіршити загальну силу сигналу. Як наслідок, інженери та спеціалісти з комунікацій повинні враховувати можливі перешкоди у своїх проектах і стратегіях, щоб забезпечити надійні канали зв'язку. Використовуючи такі методи, як схеми рознесення та адаптивне вирівнювання, можна пом'якшити негативний вплив перешкод.

Заломлення радіохвиль під час їх проходження крізь шари атмосфери з різною щільністю є ще одним фундаментальним аспектом розповсюдження [4]. Коли радіосигнали проходять через атмосферу, вони стикаються з різними шарами, такими як тропосфера, яка має різні електромагнітні властивості. Це заломлення може змінити траєкторію сигналів і вплинути на їх якість, особливо в системах супутникового зв'язку. Зміни температури, вологості та атмосферного тиску можуть додатково впливати на цю рефракційну поведінку, що призводить до змін у силі та чіткості сигналу. Отже, розуміння принципів атмосферної рефракції має важливе значення для оптимізації роботи систем радіозв'язку, особливо для міжміського та супутникового зв'язку. Завдяки точному моделюванню атмосферних умов інженери можуть передбачити потенційні проблеми та підвищити надійність сигналу.

Дифракція

Дифракція радіохвиль займає важливу роль у передачі сигналів, після чого вона дозволяє хвилям обходити навколо перешкод, таких як будівельні або природні об'єкти [1]. Однак цей процес постійно супроводжується зниженням сили сигналу, що може вплинути на його якість. Коли радіохвилі дифрагують, їх енергія розподіляється на більшу площу, що призводить до ослаблення сигналу. Це ослаблення є критичним фактором, після чого робиться, оскільки хороший сигнал може бути отриманий на приймальному пристрої. Зниження сили сигналу може бути особливо помітним у випадку, коли об'єкти, які блокують сигнал, мають значну висоту або щільність.

Залежність ефекту дифракції від довжини хвилі є ще одним ключовим аспектом, який визначає якість радіозв'язку [1]. Чим більша довжина хвилі, тим кращий сигнал може обійти перешкоди. Це означає, що низькочастотні сигнали, які мають велику хвилю, здатні краще проникнути в зону з великою кількістю перешкод. Наприклад, сигнали, що належать до довгохвильової ділянки, можуть проходити через природні перешкоди, такі як пагорби, і досягати районів, які інакше були недоступні для високочастотних сигналів. Це робить низькочастотні сигнали особливо корисними для зв'язку в складних умовах.

У міських умовах дифракція забезпечує стабільний зв'язок, незважаючи на велику кількість будівель та інших об'єктів, які можуть блокувати сигнал [1]. Завдяки здатності радіохвиль обходится навколо перешкод, функція зв'язку може бути значно розширеною. Це особливо для мобільного зв'язку, радіо- та телевізійної трансляції, де перешкоди можуть суттєво впливати на якість сигналу. У густонаселених районах, де висота будівель і щільність населення можуть створювати значні виклики, ефективна дифракція радіохвиля стає критично важливою для забезпечення надійного зв'язку.

Поглинання

Залежність від середовища є місцем поглинання радіохвиль, після водяної пара, дощ і рослинність може суттєво впливати на їхню ефективність [3]. Наприклад, під час дощу сигнали можуть виявити поглинання на рівнях 30 дБ і більше, що означає, що їхня потужність зменшується, і це ускладнює передачу інформації на великій відстані [3]. Особливо це актуально для високих частот, де поглинання є більш вираженим. Таким чином, знання про вплив навколишнього середовища на радіохвилі є критично важливим для оптимізації зв'язку, особливо в умовах поганої погоди або в місцевості з високою рослинністю.

Втрати на високих частотах є ще одним значним фактором, що впливає на передачу радіохвиль [4]. Високочастотні сигнали більшою кількістю інших до поглинання, що вимагають використання додаткових підсилювачів або спеціальних технологій для мінімізації втрат [2]. Це особливо важливо в умовах, коли необхідно забезпечити стабільний зв'язок на великих відстанях, зниження потужності сигналу може призвести до втрати якості зв'язку. Тому, при проектуванні системи радіозв'язку, важливо враховувати ці аспекти, щоб забезпечити надійність і ефективність передачі даних.

Вплив поглинання на зону покриття є критичним фактором, оскільки воно обмежує дальність зв’язку в густо забудованих або лісових районах [1]. У таких місцевостях, де природні та штучні перешкоди можуть значно знизити якість сигналу, потреба в додаткових базових станціях або ретрансляторах для покращення покриття [4]. Це особливо важливо для сучасних систем зв'язку, які

хочуть забезпечити стабільний і швидкий доступ до інформації. Врахування цих аспектів дозволяє розробникам ефективніше спланувати мережевий зв'язок та забезпечити їх безперебійну роботу в різних умовах.

Розсіювання

Розсіювання сигналу є грубим аспектом, після чого воно створює додаткові шляхи для сигналу, що може значно підвищити надійність зв'язку в складних умовах [1]. Наприклад, в умовах густих лісів або в міських вулицях, де прямий шлях між передавачем і приймачем може бути заблокований, розсіювання дозволяє сигналу досягти свого призначення через відбиття від навколишніх об'єктів. Це особливо важливо в ситуації, коли традиційні методи зв'язку можуть пізнати збою. Таким чином, розсіювання не лише забезпечує альтернативні маршрути для сигналу, але й виконує загальну надійність комунікаційних систем у складних умовах.

Належність від розміру об'єктів також відіграє ключову роль у процесі розсіювання [1]. Чим менші об'єкти страждають з довгою хвилею, тим більше вони сприяють розсіюванню, створюючи множинне відбиття. Це явище може бути особливо помітним у міських умовах, де будівлі, дерева та інші перешкоди можуть бути схожими за розміром на довжину хвилі радіосигналу. В результаті цього розсіювання виникає велика кількість додаткових шляхів, якими сигнал може подорожчати, що може покращити якість зв'язку. Проте ця особливість може ускладнити процес прогнозування та аналізу радіосигналів.

Водночас, розсіювання може негативно вплинути на якість зв'язку [1]. Часто це виявляється причиною появи «шуму» або інтерференції в каналі, що може знизити загальну якість зв'язку або вимагати додаткових методів корекції сигналу. Такі методи можуть включати використання коригувальних кодів, які не дозволяють комунікаційним системам працювати на низьких рівнях сигналу/шуму [5]. Як завдяки, хоча розсіювання і створює додаткові шляхи для сигналу, воно також приносить виклики, які потребують важливого управління для забезпечення стабільного та якісного зв'язку.

РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ШИРОКОСМУГОВИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

2.1. Особливості широкосмугових безпроводових систем зв'язку та їх вимоги до розповсюдження сигналів

Широкосмугові безпроводові системи зв'язку – це системи, які забезпечують високошвидкісну передачу даних без використання фізичних кабелів. Вони використовують широкі частотні смуги для забезпечення зв'язку на великій відстані або з великою пропускною здатністю, що робить їх незамінними для мобільного зв'язку, супутникових систем, Wi-Fi, та інших технологій. Широкосмугові системи зв'язку починаються від смуги частот понад 1 МГц.

Таблиця 2.1.

Порівняння характеристик технологій широкосмугових безпроводових систем

Технологія	Частотний діапазон	Швидкість передачі даних	Ширина смуги частот каналу зв'язку
4G LTE	700 МГц – 2.6 ГГц	До 1 Гбіт/с	20 МГц
5G	24 ГГц – 300 ГГц	До 10 Гбіт/с	100 МГц – 800 МГц
Wi-Fi 6	2.4 ГГц та 5 ГГц	До 9.6 Гбіт/с	160 МГц

Особливості широкосмугових безпроводових систем зв'язку:

1. Використання широкого спектра частот:

Широкий діапазон частот: Широкосмугові безпроводові системи використовують частоти від 300 МГц до 300 ГГц, включаючи діапазони UHF (300 МГц - 3 ГГц), SHF (3 - 30 ГГц) та EHF (30 - 300 ГГц). Використання широкого спектра дозволяє досягати швидкостей передачі понад 1 Гбіт/с для сучасних 5G-мереж.

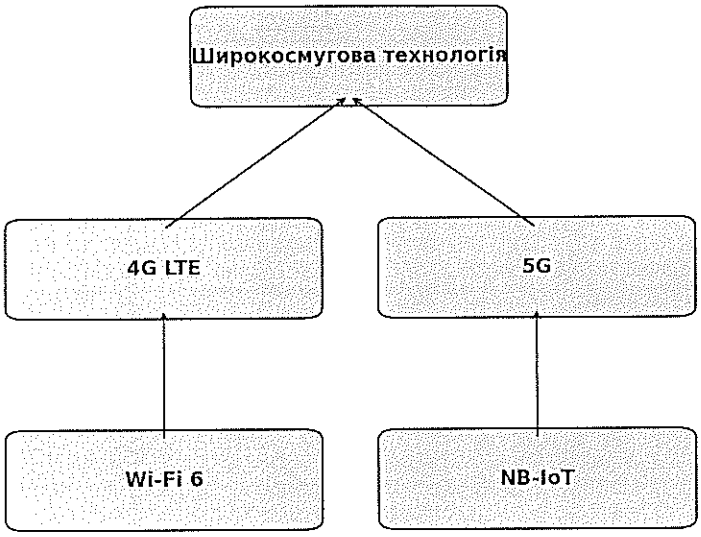


Рис. 2.1. Основі широкосмугові технології

Підтримка високошвидкісних додатків: Завдяки використанню широкого спектра забезпечується передача великих обсягів даних для таких додатків, як потокове відео 4K/8K, VoIP (Voice over IP) та VR (віртуальна реальність), які потребують пропускної здатності від 100 Мбіт/с до 1 Гбіт/с.

Широка смуга пропускання для IoT: Підтримка пристроїв Інтернету речей (IoT) через стандарти, як-от NB-IoT (Narrowband IoT) для широкосмугових IoT-застосувань, де критична стабільність і швидкість передачі до 10 Мбіт/с на пристрій.

2. Адаптивна модуляція і кодування:

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing): Використання ортогонального частотного поділу каналів забезпечує високу стійкість до багатопроменевого розповсюдження та інтерференції. У 4G та 5G системах це дозволяє передавати дані з адаптивною модуляцією від QPSK до 256-QAM, що дозволяє збільшити пропускну здатність.

Адаптивне кодування та модуляція (AMC): Зміна методів модуляції в реальному часі (наприклад, від 64-QAM до 256-QAM залежно від умов каналу) дозволяє оптимізувати швидкість передачі до 10 Гбіт/с для 5G, забезпечуючи стабільність з'єднання.

Таблиця 2.2.

Особливості широкосмугових безпроводових систем зв'язку

Особливість	Характеристика
Використання широкого спектра частот	Системи працюють у діапазоні від 300 МГц до 300 ГГц, що дозволяє досягати швидкостей передачі даних понад 1 Гбіт/с, підтримуючи додатки, такі як 4K/8K-відео, VoIP, VR.
Адаптивна модуляція і кодування	Застосування OFDM і AMC забезпечує ефективну передачу даних навіть в умовах багатопроменевого розповсюдження та перешкод, підтримуючи швидкість до 10 Гбіт/с.
Висока мобільність	Мережі 4G і 5G підтримують швидкість переміщення до 500 км/год, забезпечують безперервний хендовер і затримку менш ніж 1 мс для додатків реального часу.
Широка смуга пропускання для IoT	Технології, такі як NB-IoT, підтримують стабільну передачу даних із швидкістю до 10 Мбіт/с на пристрій, що критично для застосувань IoT у розумних містах та логістиці.
Зниження затримки	Завдяки URLLC у 5G досягається затримка менш ніж 1 мс, що важливо для автономних автомобілів, дистанційного керування та інших критичних додатків.

MIMO (Multiple Input Multiple Output): Технологія MIMO використовує декілька антен на приймачі та передавачі (наприклад, 4x4 MIMO у 5G), що дозволяє збільшити обсяг переданих даних без збільшення смуги пропускання.

3. Висока мобільність:

Швидкість переміщення: Широкосмугові безпроводові системи, такі як 4G LTE та 5G, підтримують з'єднання на швидкостях до 500 км/год, що робить їх оптимальними для транспортних засобів (наприклад, поїздів і літаків).

Підтримка безперервного хендоверу: Мережі 4G та 5G забезпечують безперервну передачу (seamless handover) між базовими станціями, зберігаючи швидкість передачі на рівні 100 Мбіт/с навіть при переходах між зонами покриття.

Зниження затримки: Технології, такі як URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) у 5G, забезпечують затримку менш ніж 1 мс, що є критичним для додатків у реальному часі, таких як автономні автомобілі та дистанційне керування.

Використання широкого спектра частот:

Широкосмугові безпровідні системи вибирають широку функцію частоти, що підвищує від 300 МГц до 300 ГГц [1]. Ця функція включає в себе УВЧ (300 МГц - 3 ГГц), НВЧ (3 - 30 ГГц) і КВЧ (30 - 300 ГГц). Використання такого широкого спектру частот дозволяє досягти високих швидкостей передачі даних, перевищуючи 1 Гбіт/с для сучасних 5G-мереж [2]. Завдяки цьому, широкосмугові системи можуть ефективно обслуговувати зростаючі потреби в швидкості та якості зв'язку, що є критичним виробництвом у світі, дещо стає все більшою кількістю.

Завдяки використанню широкого спектру частот, широкосмугові безпровідні системи забезпечують підтримку високошвидкісних додатків, таких як потокове відео 4K/8K, VoIP (Voice over IP) та VR (віртуальна реальність) [3]. Ці добавки вимагають значних обсягів пропускної здатності, які можуть досягатися від 100 Мбіт/с до 1 Гбіт/с [1]. Крім того, технологія VoIP стала популярною завдяки вашій здатності передавати медіадані в реальному часі через мережу, що потребує стабільного та швидкого з'єднання, яке може бути забезпечено лише за допомогою широкосмугових технологій.

Крім того, широкосмугові системи підтримують пристрої Інтернету (IoT) через стандарти, такі як NB-IoT (Narrowband IoT) [4]. Ця технологія дозволяє використовувати широкосмугове IoT-застосування, де критично користується стабільністю та швидкістю передачі даних до 10 Мбіт/с на пристрій [5]. Використання NB-IoT сприяє розвитку таких галузей, як логістика, інтелектуальні

лічильники, сільське господарство та "розумні міста" [6]. Таким чином, широкосмугові системи стають основою для нових інновацій, які трансформують наше життя та бізнес.

Адаптивна модуляція і кодування:

Ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) є важливою технологією в сучасних системах широкосмугового бездротового зв'язку [7]. Він використовує багаточастотну модуляцію для поділу широкосмугового сигналу на кілька піддіапазонів, що значно підвищує швидкість передачі даних і стійкість системи до багатопроменевого поширення та перешкод [8]. Цей метод є особливо вигідним у мережах 4G і 5G, де методи адаптивної модуляції дозволяють передавати дані за допомогою різних схем модуляції, починаючи від квадратурної фазової маніпуляції (QPSK) до 256-QAM. Гнучкість модуляції не тільки оптимізує пропускну здатність даних, але й максимізує використання доступної смуги пропускання, що робить OFDM надійним вибором для систем зв'язку з великою пропускною здатністю [9].

Адаптивна модуляція та кодування (AMC) додатково підвищує ефективність систем бездротового зв'язку, дозволяючи коригувати методи модуляції в реальному часі на основі поточних умов каналу [9]. Наприклад, система може перемикатися з 64-QAM на 256-QAM у міру покращення якості сигналу, таким чином оптимізуючи швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с у мережах 5G [10]. Ця адаптивність має вирішальне значення для підтримки стабільного з'єднання в середовищах із різною силою сигналу та перешкодами. Постійно контролюючи та налаштовуючи методи модуляції, AMC гарантує, що користувачі отримають надійне та високошвидкісне з'єднання, що є важливим для додатків із інтенсивним використанням пропускної здатності, таких як потокове відео та онлайн-ігри.

Технологія Multiple Input Multiple Output (MIMO) відіграє життєво важливу роль у збільшенні пропускної здатності даних без додаткової пропускної здатності [11]. Використовуючи кілька антен як на стороні передавача, так і на приймачі, MIMO може створювати кілька потоків даних одночасно, значно підвищуючи пропускну здатність систем бездротового зв'язку [12]. Наприклад, конфігурація

4x4 MIMO в мережах 5G дозволяє покращити просторове рознесення, що зменшує ймовірність погіршення сигналу через перешкоди або багатошляхове поширення [13]. Крім того, реалізація Multi-User MIMO (MU-MIMO) додатково оптимізує ефективність мережі, дозволяючи кільком користувачам одночасно використовувати один і той самий канал, таким чином максимізуючи використання доступних ресурсів і покращуючи загальну продуктивність мережі [14].

Висока мобільність:

Широкосмугові безпровідні системи, такі як 4G LTE та 5G, відрізняються високою швидкістю переміщення, що робить їх ідеальними для використання в транспортних засобах, таких як поїздки та літаки [15]. Ці технології здатні підтримувати з'єднання на швидкості до 500 км/год, що забезпечує стабільний доступ до Інтернету навіть під час швидкого пересування [15]. Це особливо важливо для користувачів, які потребують безперервного з'єднання під час подорожей. Висока мобільність дозволяє безперешкодно користуватися онлайн-сервісами, такими як потокове відео, навігація та обмін даними, що значно підвищує зручність використання сучасних технологій.

Безперервний хендовер є ще однією ключовою характеристикою мережі 4G та 5G, що забезпечує безперервну передачу даних між базовими станціями [16]. Ця технологія дозволяє підтримувати швидкість передачі на рівні 100 Мбіт/с навіть під час переходів між зонами покриття, що є критичним для користувачів, які постійно переміщуються [17]. Завдяки безперервному хендоверу, користувачі можуть насолоджуватися стабільними з'єднаннями під час поїздок, що робить ці системи ідеальними для програми, де важлива надійність з'єднання, таких як відеоконференції або онлайн-ігри.

Зниження затримки є ще важливою характеристикою, яка пропонує сучасні безпровідні системи, зокрема технології URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) у 5G [18]. Ця технологія забезпечує затримку менше 1 мс, що є критичним для додатків у реальному часі, таких як автономні автомобілі та дистанційне керування [18]. Зниження затримки відкриває нові можливості для розробки інноваційних рішень у різних сферах, зокрема в медицині, промисловості

та розвагах, де швидкість реакції системи може суттєво вплинути на ефективність і безпеку. Таким чином, підвищена швидкість, підтримка безперервного хендоверу та зниження затримки є кількість елементів, які забезпечують високу мобільність у безпровідних комунікаційних системах.

Вимоги до розповсюдження сигналів у широкосмугових безпроводових системах зв'язку:

1. Пряма лінія видимості (Line of Sight, LOS):

Потреба в LOS для міліметрових хвиль: Високочастотні сигнали (24 ГГц і вище), які використовуються у 5G, мають короткий діапазон дії та потребують LOS для надійного зв'язку на відстані до 200 метрів.

Зменшення втрат сигналу: Використання технологій, таких як Beamforming (формування променя), допомагає зменшити втрати сигналу в умовах LOS шляхом спрямованої передачі сигналу до користувача.

Ретранслятори та мікростанції: Для підтримки з'єднання в умовах обмеженої видимості (наприклад, у густонаселених міських зонах) використовуються ретранслятори та мікростанції, що розширюють зону покриття.

2. Мінімізація перешкод:

Технологія MU-MIMO (Multi-User MIMO): Забезпечує одночасну передачу даних багатьом користувачам через використання декількох антен, що знижує ризик інтерференції та покращує якість зв'язку.

Використання DSS (Dynamic Spectrum Sharing): Динамічний розподіл спектру дозволяє безпроводовим системам ефективно використовувати наявні частотні ресурси, уникати перевантажень і мінімізувати інтерференцію.

Інтерференційне пригнічення (Interference Cancellation): Технології пригнічення інтерференції в 5G дозволяють уникати перешкод від сусідніх каналів, покращуючи стабільність зв'язку на 20-30% у перевантажених умовах.

3. Ефективне управління спектром:

Впровадження когнітивного радіо: Технологія когнітивного радіо дозволяє безпроводовим системам самостійно обирати та змінювати канали в реальному

часі, залежно від умов у спектрі, що дозволяє мінімізувати затримки та зберігати якість зв'язку.

Таблиця 2.3.

Вимоги до розповсюдження сигналів у широкосмугових безпроводових системах зв'язку

Вимога	Характеристика
Пряма лінія видимості (LOS)	Високочастотні сигнали (24 ГГц і вище) вимагають прямої лінії видимості для надійного зв'язку на відстанях до 200 метрів.
Beamforming (формування променя)	Забезпечує спрямовану передачу сигналу до користувача, зменшуючи втрати в умовах LOS.
Ретранслятори та мікростанції	Розширюють зону покриття у густонаселених міських зонах або в умовах обмеженої видимості.
Мінімізація перешкод	Технології, як-от MU-MIMO та DSS, знижують інтерференцію та забезпечують стабільність зв'язку.
Інтерференційне пригнічення	Забезпечує усунення перешкод від сусідніх каналів, підвищуючи стабільність зв'язку на 20-30% у перевантажених умовах.
Ефективне управління спектром	Використання когнітивного радіо, NOMA та Spectrum Refarming оптимізує використання частотного спектра для покращення якості зв'язку.

NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access): Використовується для одночасного обслуговування кількох користувачів на тій самій частоті за рахунок диференціації сигналів за потужністю. Це значно збільшує пропускну здатність, підтримуючи швидкості до 10 Гбіт/с.

Розширення частотного спектра (Spectrum Refarming): Дозволяє перепризначати існуючі частоти (наприклад, із 2G або 3G на 4G/5G), що підвищує ефективність використання спектра для новітніх технологій та забезпечує стабільність мережі.

Пряма лінія видимості (Line of Sight, LOS):

Для міліметрових хвиль, особливо в системах 5G, пряма лінія видимості (LOS) є критично важливою для забезпечення надійного зв'язку [1]. Високочастотні сигнали, які працюють на частотах 24 ГГц і вище, мають короткі дії, зазвичай до 200 метрів, що обмежує їх здатність до проходження через перешкоди, як стіни або дерева [2]. Це означає, що для успішної передачі даних між передавачами та приймачами важливо, щоб обидва пристрої були видимі в одному, що істотно закінчилося якістю зв'язку та зменшує ймовірність втрат сигналу.

Змінення внутрішнього сигналу в умовах LOS може бути досягнуто за допомогою технологій, таких як формування променя (Beamforming) [3]. Ця технологія дозволяє направляти сигнал через користувача, що зменшує втрати, викликані розсіюванням і відбитком сигналу від навколишніх об'єктів [1]. Формування програм дозволяє системам зв'язку ефективно використовувати доступний енергетичний сигнал, забезпечуючи стабільніше з'єднання та покращуючи загальну продуктивність мережі. Це особливо важливо для міліметрових хвиль, де навіть невеликі втрати можуть суттєво вплинути на якість з'єднання.

У ситуаціях, коли видимість обмежена, наприклад, у густонаселених міських зонах, використовують ретранслятори та мікростанції [4]. Пристрої допомагають розширити зону покриття, забезпечуючи стабільний зв'язок навіть при наявності фізичних перешкод між передавачами і приймачами [2]. Ретранслятори підтримують "слабкий" сигнал від базової його станції, підсилюють і повторно передають, що дозволяє підтримувати зв'язок на більших відстанях. Впровадження таких рішень є кроком у розвиток системи широкосмугового бездротового зв'язку,

оскільки вони забезпечують високу якість обслуговування в умовах високого завантаження в мережу.

Мінімізація перешкод:

Технологія MU-MIMO (Multi-User MIMO) є ключовим інструментом для мінімізації перешкод у безпровідних комунікаційних системах [5]. Завдяки використанню небагатьох антен, MU-MIMO дозволяє одночасну передачу даних кільком користувачам, що значно знижує ризик інтерференції [6]. Це досягається шляхом створення кількох потоків даних для різних користувачів, що дозволяє одночасно обслуговувати кілька об'єднаних без втрати якості зв'язку [7]. В результаті ця технологія забезпечує: - Високу швидкість передачі даних - Широке покриття - Економію енергії для мобільних пристроїв Впровадження MU-MIMO в мережах Wi-Fi 802.11ac демонструє значні переваги в умовах високого навантаження, де традиційні технології можуть стати недоліками [8].

Використання DSS (Dynamic Spectrum Sharing) також є великим аспектом для зменшення інтерференції в безпровідних системах [9]. Ця технологія дозволяє ефективно використовувати доступні частотні ресурси, що особливо важливо в умовах перевантаження спектру. Динамічний спектр розподілу посилюється уникати ситуацій, коли декілька систем одночасно намагаються використовувати одну й ту частоту, що призводить до зниження якості зв'язку. Крім того, DSS забезпечує: - Гнучкість у використанні частоти - Оптимізація загального спектру - Зменшення затримок у передачі даних Це в результаті підвищення підвищення стабільності та надійності зв'язку в умовах, коли ресурси обмежені.

Інтерференційне пригнічення є ще одним із елементів, що сприяє мінімізації перешкод у безпровідних комунікаційних системах, зокрема в технології 5G [10]. Ця технологія дозволяє уникати перешкод від сусідніх каналів, що, за даними дослідженнями, може підвищити стабільність зв'язку на 20-30% у перевантажених умовах [11]. Інтерференційне проникнення досягається через використання алгоритмів, які аналізують та коригують сигнали в реальному часі, забезпечуючи чистіший і більш надійний зв'язок. Це дозволяє: - Підвищити загальну продуктивність мережі - Змінити ймовірність втрати даних - Поліпшити досвід

користувача Впровадження таких технологій є критично важливим для забезпечення ефективної роботи сучасних безпровідних систем, що вимагає до якості сигналу.

Ефективне управління спектром:

Впровадження когнітивного радіо є великим кроком у розвиток безпровідних комунікаційних систем [12]. Ця технологія дає можливість безпроводовим пристроям автономно вибирати та змінювати частотні ділянки або канали зв'язку в реальному часі, залежно від умов у спектрі. Завдяки цьому, когнітивне радіо здатне мінімізувати затримки та зберегти високу якість зв'язку навіть в умовах щільного спектрального навантаження. Це особливо важливо в сучасному світі, де зростає кількість пристроїв, які використовують безпровідні технології, і потреба в ефективному використанні доступного спектру стає критично важливою.

NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) є ще однією ключовою технологією, що підвищує ефективність безпроводових систем [13]. Метод дозволяє одночасно обслуговувати кілька користувачів на одній цій частоті, диференціюючи сигнали за потужністю. Завдяки цьому NOMA може підтримувати швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с, що значно забезпечує пропускну здатність мережі [14]. Технологія NOMA є особливо корисною в контексті збільшення попиту на мобільний Інтернет, після чого вона дозволяє забезпечити високу якість зв'язку для великої кількості користувачів одночасно.

Розширення частотного спектра, або Spectrum Refarming, є важливою стратегією для підвищення ефективності використання спектра в безпровідних системах [12]. Цей процес дозволяє перепризначити існуючі частоти, такі як 2G або 3G, для новітніх технологій, такі як 4G або 5G. Завдяки цьому мережа може не лише підвищити свою швидкість і пропускну здатність, але й забезпечити стабільність та надійність зв'язку. Розширення частотного спектра також зменшує зменшення перешкоди та зберігає якість зв'язку, що є критичним випадком для сучасного користувача.

2.2. Методи підвищення ефективності роботи широкосмугових систем на основі відеокодеків H.264/H.265

Відеокодеки, такі як H.264 і H.265, є ключовими технологіями, що забезпечують стійкість і декодування відеоданих для передачі та зберігання [1]. Основне призначення цих кодеків дозволяє оптимізувати використання пропускної здатності та зменшити обсяг даних, що передаються, без втрати якості відео [2]. H.264, наприклад, дозволяє записувати відеопотік у форматі HD зі швидкістю приблизно 7-8 мегабайт на секунду [3]. Це робить його популярним вибором для багатьох сучасних застосунків, таких як потокове відео, відеоконференції та цифрове телебачення.

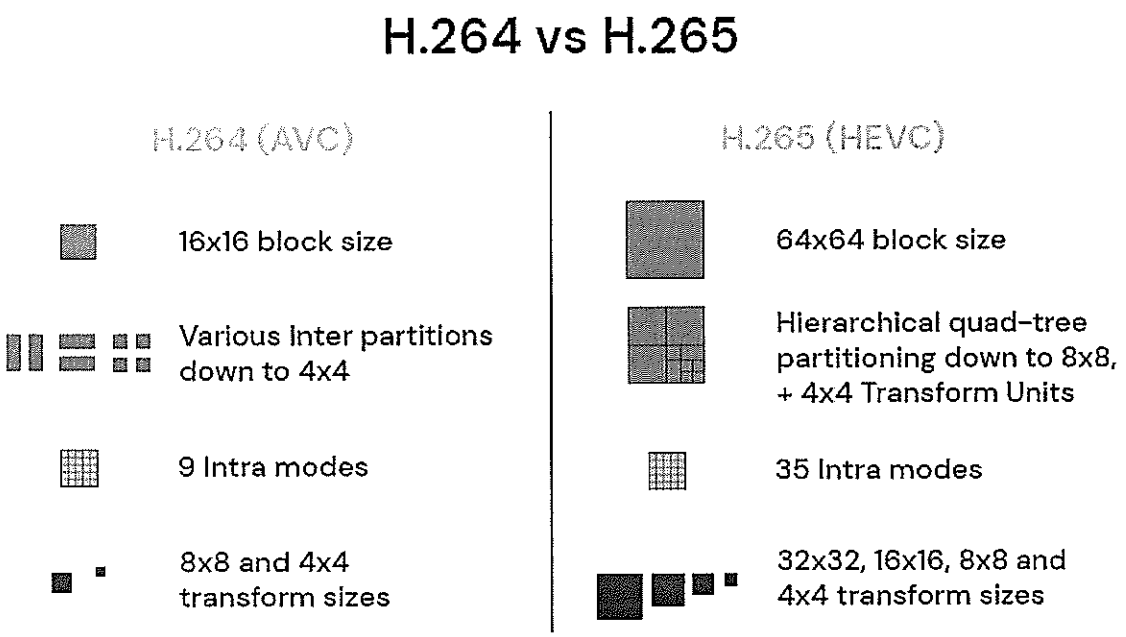


Рис. 2.2. Сучасні відеокодеки

Історія розвитку H.264 і H.265 демонструє еволюцію відеокодеків у відповідь на зростаючі вимоги до якості та ефективності стиснення [2]. H.264 з'явився на ринку ще в 2013 році, ставши стандартом для HD-запису [2]. У той же час H.265, також відомий як HEVC (High Efficiency Video Coding), був розроблений для подальшого зменшення обсягу даних, досягаючи зниження пропускної здатності майже на 50% у порівнянні з H.264 [4]. Це дозволяє користувачам отримувати

більш якісне відео навіть при обмежених ресурсах мережі, що робить H.265 ідеальним для технологій, таких як 4K-відео [5].

Таблиця 2.3.

Порівняння технічних характеристик відеокодеків H.264 і H.265

Характеристика	H.264 (AVC)	H.265 (HEVC)
Ефективність стиснення	Зниження бітрейту на 50% порівняно з MPEG-2. Використовує блоки розміром 16x16 (макроблоки).	Зниження бітрейту на 30-50% порівняно з H.264. Використовує coding units розміром до 64x64.
Підтримка роздільності	До 4K (хоча оптимізовано для 1080p). Максимальний розмір кадру: 4096x2304.	До 8K (8192x4320). Підтримує адаптивне підвищення роздільності для майбутніх форматів.
Стійкість до помилок	Менш ефективна для слабких мереж, підтримка FEC (Forward Error Correction) обмежена.	Покращене виправлення помилок, зменшена ймовірність втрат кадрів у нестабільних мережах.
Обчислювальні вимоги	Низькі вимоги до процесора, оптимізований для пристроїв з обмеженими ресурсами.	Високі вимоги до апаратного забезпечення через складні алгоритми стиснення.
Розмір блоку	Фіксований розмір макроблоку 16x16, що обмежує ефективність при роботі з високою роздільністю.	Використовує ієрархічну структуру блоків (CTU) розміром до 64x64 для більшого стискання.
Профілі та рівні	Baseline, Main, High (до рівня 5.1). Підтримує обмежений	Main, Main10, Main Still Picture. Адаптивні профілі для високоякісного відео.

Характеристика	H.264 (AVC)	H.265 (HEVC)
	набір параметрів для старих систем.	
Затримка	Мінімальна затримка, придатний для відеоконференцій.	Збільшена затримка через складність обробки, але оптимізована для 4K/8K-потоків.
Застосування	Широке використання у потоковому відео, відеоконференціях, телебаченні (Full HD).	Оптимізований для 4K/8K-відео, VR, AR, де висока пропускна здатність є критичною.

Ключові відмінності між H.264 і H.265 залежать від їхньої ефективності стиску та якості відео [1]. H.265 може досягти на 50% більшої ефективності стійкості, що означає, що файли з H.265 можуть бути значно меншими за розміром при збереженні порівняльної якості відео [6]. Це особливо важливо для системи з обмеженою пропускною здатністю, де H.265 може підтримувати безперебійну передачу даних з кількох камер без втрати якості зображення [7]. Таким чином, вибір між H.264 і H.265 залежить від конкретних потреб системи та умов передачі даних.

Технічні характеристики H.264

Однією з ключових особливостей кодека H.264 є його вражаюча ефективність стиснення, яка значно впливає на керування бітрейтом [8]. H.264, встановлений як стандарт у 2013 році, дозволяє записувати відеопотоки високої чіткості, зберігаючи швидкість обробки приблизно 7-8 мегабайт на секунду [2]. Ця ефективність забезпечує ефективне використання смуги пропускання, що робить можливим передачу високоякісного відео навіть в умовах обмеженої мережі. У практичних додатках H.264 можна використовувати в різних сценаріях, включаючи потокове передавання та відеоконференції, де вкрай важливо підтримувати якість зображення без перевантаження пропускної здатності мережі. Здатність кодека

ефективно стискати відеофайли означає, що користувачі можуть насолоджуватися чітким зображенням, мінімізуючи використання даних.

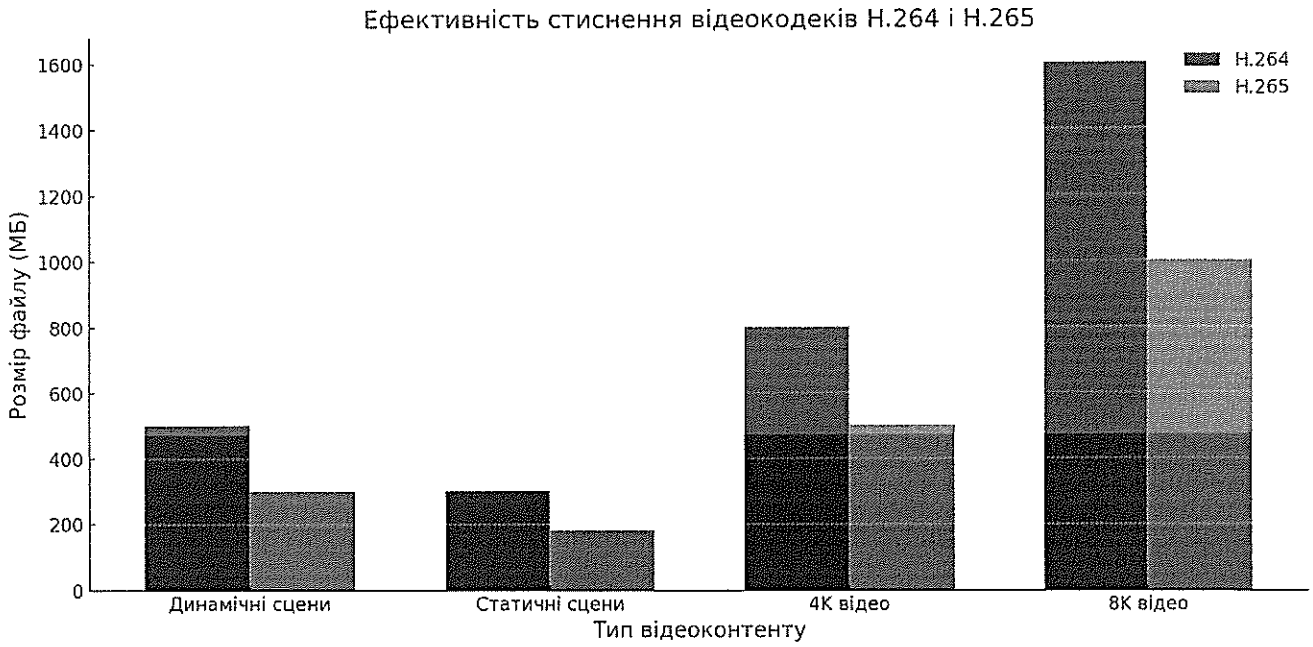


Рис. 2.3. Ефективність стиснення відеокодеків H.264 і H.265

H.264 також підтримує різні роздільності та частоти кадрів, що робить його універсальним вибором для різних додатків [2]. Кодек може працювати зі стандартними форматами та форматами високої чіткості, адаптуючись до потреб різних постачальників контенту та споживачів. Ця гнучкість особливо важлива в епоху, коли пристрої варіюються від смартфонів до телевізорів з великим екраном. Завдяки підтримці різноманітної роздільної здатності H.264 забезпечує передачу відеовмісту без шкоди для якості на різних платформах. Його здатність підтримувати високу якість зображення з різною частотою кадрів сприяє більш плавному перегляду, що особливо важливо для насичених діями сцен або швидкого вмісту.

Іншою важливою особливістю H.264 є його стійкість до помилок і адаптованість до мережі, що покращує його використання в бездротових системах [7]. Кодек розроблено для підтримки якості відео навіть у складних мережевих умовах, де може статися втрата пакетів або затримка. Ця стійкість має важливе значення для потокових додатків, де безперебійне відтворення має вирішальне

значення. Крім того, H.264 може динамічно регулювати свій бітрейт на основі доступної пропускної здатності мережі, забезпечуючи плавні переходи під час відтворення. Ця можливість адаптації гарантує, що користувачі можуть продовжувати насолоджуватися безперервним потоковим відео, незалежно від коливань у продуктивності мережі.

Технічні характеристики H.265

H.265, також відомий як високоефективне кодування відео (HEVC), представляє значно покращені методи стиснення порівняно з його попередником, H.264 [9]. Ця підвищена ефективність дозволяє H.265 досягати на 50% вищих рівнів стиснення, що призводить до менших розмірів файлів, зберігаючи порівнянну якість відео [4]. Ця можливість особливо корисна для бездротових систем, де пропускна здатність може бути обмеженою, а потреба у високоякісному відео зростає. Завдяки H.265 зменшення розміру даних забезпечує більш плавну передачу та ефективніше використання мережевих ресурсів, що робить його ідеальним вибором для додатків, які потребують високоякісної передачі відео.

Однією з видатних особливостей H.265 є його підтримка вищої роздільної здатності, включаючи 4K і вище [10]. На відміну від H.264, який в основному був розроблений для форматів HD, H.265 ефективно задовольняє зростаючий попит на вміст надвисокої чіткості. Наприклад, H.265 може зменшити розмір файлу приблизно на 64% при роздільній здатності 4K [5]. Це означає, що користувачі можуть насолоджуватися відео високої роздільної здатності без відповідного збільшення використання пропускної здатності, що є критично важливим для бездротових систем, які можуть мати проблеми з високою швидкістю передачі даних. Оскільки все більше пристроїв і платформ використовують роздільну здатність 4K і навіть 8K, важливість можливостей H.265 для доставки такого контенту стає все більш очевидною.

На додаток до ефективності стиснення та підтримки високої роздільної здатності, H.265 також пропонує покращене виправлення помилок і адаптивність для потокових програм [4]. Цей кодек призначений для кращої обробки коливань мережі, забезпечуючи стабільну якість відео, навіть якщо пропускна здатність

змінюється. Наприклад, з H.265 пропускна здатність мережі 20 Мб може підтримувати дані з більш ніж 20 камер одночасно без шкоди для якості зображення [7]. Ця адаптивність особливо важлива в бездротових середовищах, де потужність і якість сигналу можуть коливатися, що робить H.265 надійним рішенням для надійного потокового відео. Поєднання цих функцій робить H.265 потужним інструментом для сучасних бездротових відеозастосунків, оптимізуючи продуктивність і якість.

Переваги H.265 перед H.264 для бездротових систем

Однією з основних переваг H.265 перед H.264 є зменшення споживання пропускної здатності [4]. Новий кодек H.265 забезпечує зниження вимог до пропускної здатності майже на 50 відсотків порівняно з H.264, що робить його надзвичайно ефективним для бездротових систем [4]. Це означає, що для передачі відео однієї й тієї якості H.265 використовується менша кількість ресурсів, що особливо важливо в умовах обмеженої пропускної здатності, наприклад, у мобільних мережах. Зменшене збереження пропускної здатності дозволяє користувачам отримати чіткіше зображення без затримок, що робить H.265 оптимальним вибором для сучасних відеосистем.

Ще важливою перевагою H.265 є покращена якість потокової передачі для змінних умов [11]. Кодек H.265 розроблений з урахуванням сучасних вимог до відео, зокрема він успішно справляється з нестабільністю мережі, зберігаючи високу якість зображення навіть при зниженій пропускній здатності [12]. Це особливо корисно для бездротових систем, де користувачі можуть стикатися з проблемами з'єднання. Завдяки вдосконаленим алгоритмам кодування, H.265 забезпечує стабільну якість потокової передачі, що робить його ідеальним для використання в умовах, коли доступ до високошвидкісного Інтернету може бути обмеженим.

Крім того, H.265 також сприяє довгому терміну служби батареї для портативних пристроїв [4]. Оскільки H.265 використовує меншу пропускну здатність для передачі відео одного й того рівня якості, це означає, що пристрої, які його використовують, споживають меншу енергію [13]. Це особливо важливо для

мобільних камер та інших портативних пристроїв, де обмежений заряд батареї може суттєво вплинути на їхню продуктивність. Завдяки зменшенню навантаження на батарею, користувачі можуть підкріплюватися тривалішим використанням пристроїв без необхідності частого підзарядження, що забезпечує зручність і ефективність використання технології H.265 у бездротових системах.

Проблеми та міркування під час використання H.264 і H.265

Однією з важливих проблем під час використання кодеків H.264 і H.265 є сумісність із застарілими системами [2]. H.264 існує з 2013 року та широко підтримується на різних пристроях, що робить його надійним вибором для багатьох програм. Навпаки, H.265, хоча й забезпечує кращу ефективність стиснення — на 50% більше, ніж H.264 [14], — не підтримується на старому апаратному забезпеченні. Відсутність сумісності може створити проблеми для організацій, які прагнуть запровадити нові технології, зберігаючи існуючу інфраструктуру. У результаті користувачі можуть зіткнутися з труднощами під час потокової передачі або відтворення вмісту, закодованого H.265, на старіших пристроях, які підтримують лише кодеки H.264 або більш ранні версії. Така ситуація може призвести до додаткових витрат і ускладнень, оскільки організаціям може знадобитися оновити свої системи або конвертувати відео в більш сумісний формат.

Проблеми з ліцензуванням і патентами також створюють значні проблеми при використанні кодеків H.264 і H.265 [15]. Кодек H.264 обтяжений різними ліцензійними зборами, які можуть збільшити загальну вартість розгортання. Подібним чином H.265 має більш складну структуру ліцензування, що може стримувати розробників і компанії від його прийняття. Необхідність орієнтуватися в цих ліцензійних угодах може ускладнити інтеграцію цих кодеків у продукти чи послуги, особливо для невеликих компаній з обмеженим бюджетом. Крім того, мінливий характер патентних претензій у галузі стиснення відео може призвести до невизначеності щодо майбутніх ліцензійних зобов'язань, що може надалі перешкоджати широкому впровадженню технології H.265.

Обчислювальна потужність, необхідна для декодування H.265, є ще однією перешкодою для його реалізації [4]. У порівнянні з H.264, який має відносно скромні вимоги до обробки, H.265 вимагає значно потужнішого апаратного забезпечення для ефективного декодування відеопотоків. Цей підвищений попит може обмежити використання H.265 у пристроях з обмеженими можливостями обробки, таких як смартфони або потокові пристрої низького рівня. У результаті користувачі можуть зіткнутися з проблемами продуктивності, зокрема збільшеною затримкою та погіршеною якістю відтворення, під час спроби декодувати відео H.265 на менш потужних пристроях. Різниця у вимогах до обробки між двома кодеками означає, що хоча H.265 забезпечує чудове стиснення, це також вимагає ретельної оцінки апаратних можливостей для забезпечення оптимальної продуктивності та взаємодії з користувачем.

Методи підвищення ефективності роботи широкосмугових безпроводових систем на основі відеокодеків H.264 і H.265 базуються на оптимізації стиснення та передачі відеоконтенту з мінімальними втратами якості та максимальною ефективністю використання мережевих ресурсів. Відеокодеки H.264 (AVC) і H.265 (HEVC) є найбільш поширеними стандартами для стиснення відео, особливо в умовах, де важливі висока пропускна здатність та ефективне використання смуги пропускання.

Основні методи підвищення ефективності роботи широкосмугових безпроводових систем на основі H.264/H.265:

Оптимізація стиснення відеоданих:

Зменшення бітрейту: H.265 дозволяє знижувати бітрейт на 30-50% порівняно з H.264 без втрат якості, що особливо корисно для мобільних мереж із обмеженою пропускною здатністю. Це дозволяє передавати відео високої роздільної здатності, наприклад 4K, при низьких швидкостях (3-5 Мбіт/с).

Інтерфреймове кодування (Inter-frame): Кодеки H.264 і H.265 використовують предиктивне кодування між кадрами (P-кадри, B-кадри), що зменшує обсяг даних, необхідний для передачі відео, зберігаючи високу якість.

Таблиця 2.4.

Методи підвищення ефективності роботи широкосмугових безпроводових систем на основі H.264 та H.265

Метод	Характеристика
Зменшення бітрейту	H.265 дозволяє знижувати бітрейт на 30-50% порівняно з H.264 без втрат якості, що є ключовим для передачі 4K відео при низьких швидкостях (3-5 Мбіт/с).
Інтерфреймове кодування	Використання предиктивного кодування між кадрами (P-кадри, B-кадри), що суттєво зменшує обсяг переданих даних.
Адаптивна зміна бітрейту	Автоматичне регулювання бітрейту залежно від пропускної здатності мережі, що забезпечує якість відео навіть у умовах обмеженої пропускної здатності.
Зменшення затримки	Використання протоколу RTP та буферизації до 200 мс дозволяє мінімізувати затримки для реального часу, таких як відеоконференції.
Багаторівневе кодування	SVC (Scalable Video Coding) дозволяє кодувати відео на різних рівнях якості, адаптуючись до умов мережі у реальному часі.
Оптимізація енергоефективності	Використання вбудованих апаратних кодеків та нейронних мереж для покращення стиснення знижує енергоспоживання пристроїв.

Інтрафреймове кодування (Intra-frame): Застосування оптимізованого внутрішньокадрового стиснення забезпечує високу якість на рівні кожного кадру і зменшує спотворення, особливо для додатків реального часу.

Адаптивне налаштування параметрів відеопотоку:

Адаптивна зміна бітрейту (ABR): Автоматична зміна бітрейту відповідно до доступної пропускної здатності мережі дозволяє уникати буферизації та зберігати

якість відео. Прикладом є динамічне регулювання між 1 Мбіт/с і 10 Мбіт/с залежно від мережевих умов.

Підтримка багаторівневого кодування (Scalable Video Coding, SVC): Використання багаторівневого кодування H.264/H.265 дозволяє кодувати відео на різних рівнях якості та передавати їх паралельно, що забезпечує адаптацію до умов мережі в реальному часі.

Управління роздільною здатністю: Залежно від якості каналу, роздільну здатність можна динамічно змінювати з високої (1080p, 720p) на нижчу (480p або 360p) для оптимізації пропускної здатності, що особливо корисно для мобільних широкосмугових мереж.

Зниження затримки при передачі відео:

Зменшення буферизації: Використання кодеків H.264/H.265 зі зменшеною буферизацією дозволяє зменшити затримку при передачі відео до 100-200 мс, що є критичним для додатків реального часу, таких як відеоконференції та IP-камери.

Попереднє кодування на основі MCTF (Motion-Compensated Temporal Filtering): Фільтрація на основі компенсації руху дозволяє зменшити затримку у відеопотоці, підвищуючи ефективність у середовищах із високою частотою кадрів (60 кадрів на секунду та вище).

Використання RTP (Real-time Transport Protocol): Протокол RTP оптимізує передачу даних із мінімальною затримкою і високою точністю синхронізації, що дозволяє знизити втрати пакетів та забезпечити стабільність для потокового відео.

Підтримка багатопотокової передачі (Multi-Stream Transmission):

Розподілення трафіку через MIMO: Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output), що застосовується у широкосмугових мережах, дозволяє передавати кілька потоків відео одночасно, що знижує навантаження на окремі канали.

Низькопрофільне кодування для різних пристроїв: Кодеки H.264/H.265 дозволяють використовувати профілі з різними рівнями складності (наприклад, High Profile для телебачення і Baseline Profile для мобільних пристроїв), що забезпечує оптимальне налаштування для кожного пристрою.

Сегментація відео для CDN (Content Delivery Network): Система розподіленої доставки вмісту забезпечує передачу даних у різні мережі одночасно, оптимізуючи пропускну здатність та знижуючи затримку завдяки збереженню відеофрагментів у різних місцях мережі.

Оптимізація енергоефективності:

Інтеграція з апаратними кодеками: Більшість сучасних пристроїв мають вбудовані апаратні кодеки H.264/H.265, які знижують навантаження на процесор і зменшують енергоспоживання, особливо в мобільних широкосмугових мережах.

Стиснення на базі нейронних мереж (AI-Based Compression): Використання штучного інтелекту для покращення стиснення дозволяє підвищити ефективність роботи кодеків, зменшуючи бітрейт на 10-20% без втрат якості.

Оптимізовані профілі для відеоконференцій: Налаштування профілів для зменшення бітрейту та підвищення якості відео з одночасним зменшенням енергоспоживання забезпечує ефективне використання широкосмугових систем у реальному часі.

2.3. Дослідження завадостійкості систем широкосмугових безпроводових систем за допомогою ПЗ Matlab Simulink

Моделювання системи зв'язку:

Першим кроком у моделюванні системи бездротового зв’язку в Matlab Simulink є вибір відповідної конфігурації для системи. Це передбачає вибір типу бездротової технології для імітації, як-от Wi-Fi, LTE, 5G або WiMAX [1]. Кожна з цих технологій має відмінні характеристики, включаючи пропускну здатність, швидкість передачі даних і вимоги до потужності сигналу. Наприклад, у той час як системи 5G забезпечують наднадійний зв’язок із малою затримкою, Wi-Fi широко використовується для локальних мереж і пропонує гнучкість у розподілі пропускної здатності [2]. Після вибору технології вкрай важливо встановити основні параметри, які впливатимуть на продуктивність системи. Ключові

параметри включають: - Пропускна здатність: визначає обсяг даних, які можна передати. - Швидкість передачі: впливає на ефективність передачі даних. - Потужність сигналу: впливає на діапазон і надійність з'єднання. Ці фундаментальні рішення керуватимуть наступними етапами моделювання та гарантуватимуть, що моделювання відображатиме реалістичні операційні сценарії.

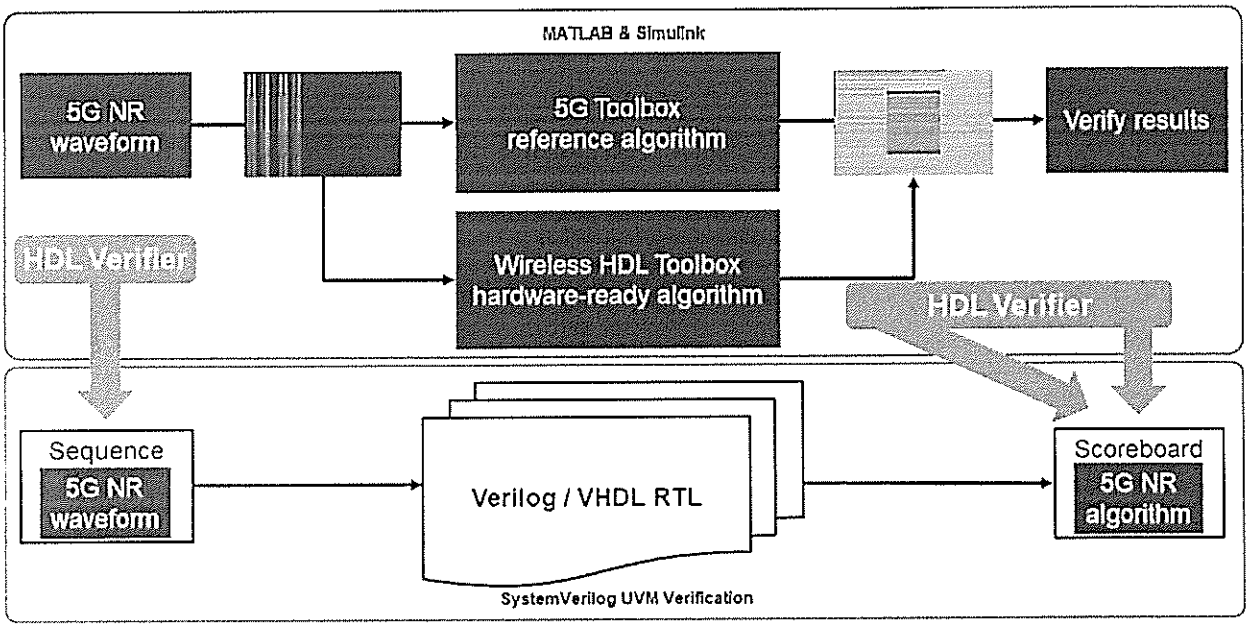


Рис. 2.4. Створення форми сигналу 5G для перевірки SystemVerilog за допомогою 5G Toolbox

Після встановлення конфігурації наступний етап передбачає моделювання фізичного рівня системи зв'язку. Matlab Simulink надає надійні інструменти для моделювання фізичного рівня за допомогою таких блоків, як OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним поділом) і MIMO (багато входів і виходів), обидва з яких є ключовими в широкосмугових системах [3]. OFDM є особливо вигідним завдяки своїй здатності справлятися з багатопроменевими перешкодами та максимізувати пропускну здатність даних шляхом поділу одного потоку даних на кілька менших підсигналів, які передаються одночасно [4]. Технологія MIMO, з іншого боку, підвищує швидкість передачі даних і надійність завдяки використанню кількох антен як на стороні передавача, так і на приймачі.

Цей подвійний підхід дозволяє більш ефективно використовувати доступну смугу пропускання та покращує загальну продуктивність системи бездротового зв'язку.

Останнім аспектом моделювання бездротової системи є конфігурація параметрів модуляції, яка є критичною для оптимізації якості сигналу та стійкості до перешкод. Вибір схеми модуляції — QPSK, 16-QAM або 64-QAM — суттєво вплине на продуктивність системи з точки зору швидкості передачі даних і частоти помилок [5]. Наприклад, 64-QAM забезпечує вищу пропускну здатність даних за рахунок кодування більшої кількості бітів на символ, але також більш чутливий до шуму та перешкод. Навпаки, QPSK пропонує збалансований підхід із меншою чутливістю до помилок, зберігаючи гідну швидкість передачі даних [6]. Правильне налаштування цих параметрів модуляції гарантує, що система може адаптуватися до змінних умов каналу, таким чином зберігаючи надійний зв'язок навіть за наявності перешкод. Ця ретельна настройка типів модуляції є важливою для досягнення оптимальної продуктивності в реальних програмах.

Додавання завад у модель:

Інтерференційний шум є ключовим аспектом, який потрібно виконати при моделюванні безпровідних систем зв'язку [1]. Моделювання інтерференцій від сусідніх каналів або інших джерел, таких як інші безпровідні системи, дозволяє оцінити вплив зовнішніх перешкод на якість сигналу. Крім того, інтеграція цих елементів у Simulink дозволяє детально аналізувати, як інтерференція впливає на параметри системи, включаючи: - Зниження якості сигналу - Збільшення частоти помилок - Зміни в швидкості передачі даних Таким чином, коректне моделювання інтерференційного шуму є етапом у забезпеченні надійності безпровідних комунікацій.

Додавання білих гаусових шумів (AWGN) у модель є стандартним підходом для дослідження впливу випадкових шумів на якість передачі [6]. AWGN — це тип шуму, який заважає інформаційному каналу передачі і характеризується рівномірним спектром у всіх частотах [9]. У Simulink, підключення AWGN до моделі дозволяє проводити експерименти з визначення завадостійкості системи, що є критично важливим для вивчення продуктивності безпровідних систем

зв'язку. Аналіз результатів, отриманих під час тестування на AWGN, може включати: - Вимірювання частоти помилок (BER) - Оцінку впливу шуму на різні типи модуляцій - Визначення оптимальних умов для передачі даних Цей процес забезпечує цінні дані для подальшого вдосконалення безпровідних технологій.

Моделювання багатопроменевого розширення є ще важливою складовою при розробці моделей безпровідних систем у Simulink [2]. Багатопроменеве поширення, яке викликане відбитками та розсіюванням сигналів у міських умовах, може істотно впливати на якість передачі даних. Підключення багатопроменевих каналів до моделі дозволяє перевірити стійкість системи до спотворень, які можуть виникнути в реальних умовах. При моделюванні багатопроміневого населення спостерігається недолік: - Вплив відбитків від будівель та інших об'єктів - Змінення сигналу через розсіювання - Можливість виникнення мультипатчових інтерференцій Це дозволяє дослідникам отримати більш точні результати та оптимізувати системи для їхньої надійності в умовах реального світу.

Оцінка показників завадостійкості:

Коефіцієнт бітових помилок (BER) є критичним показником для оцінки стійкості широкосмугових бездротових систем до перешкод, і Matlab Simulink служить ефективним інструментом для обчислення та аналізу цього параметра [7]. По суті, BER вимірює кількість бітів, які неправильно отримані, порівняно із загальною кількістю переданих бітів. Нижчий BER вказує на більш надійну систему, здатну протистояти різним перешкодам. Моделюючи різні сценарії в Matlab Simulink, дослідники можуть спостерігати, як зміни в конфігураціях системи та умовах навколишнього середовища впливають на BER. Цей аналіз дає цінну інформацію про надійність бездротового зв'язку за різних рівнів шуму та перешкод, що дозволяє оптимізувати продуктивність системи.

Іншим важливим аспектом оцінки перешкодостійкості бездротових систем є співвідношення сигнал/шум (SNR), яке вимірюється для кожного сценарію, що включає різні типи перешкод [8]. SNR являє собою відношення потужності корисного сигналу до потужності шуму, що впливає на нього. Вищий SNR зазвичай корелює з нижчим BER, що вказує на кращу продуктивність бездротової системи.

У Matlab Simulink дослідники можуть візуалізувати зв'язок між SNR і BER, що стає вирішальним для розуміння ефективності системи бездротового зв'язку. Цей взаємозв'язок має важливе значення для проектування систем, які можуть підтримувати високу продуктивність за наявності шуму, зрештою підвищуючи надійність широкосмугових бездротових технологій.

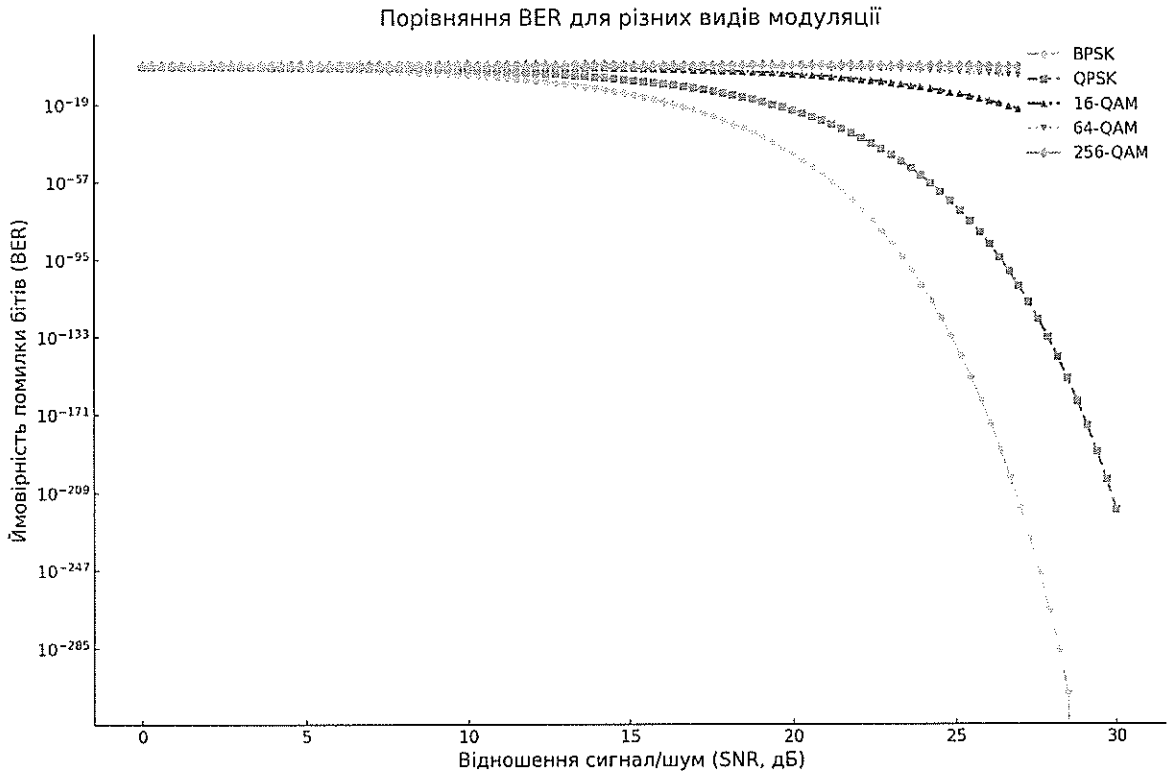


Рис. 2.5. Розрахунок коефіцієнта бітових помилок (BER)

Величина вектора помилки (EVM) — це ще один важливий показник, який відображає вплив шуму на цілісність сигналу, особливо в системах, що вимагають високої точності модуляції, таких як 64-QAM, що використовується в мережах LTE або 5G [9]. EVM кількісно визначає векторну різницю між ідеальним переданим сигналом і фактично прийнятим сигналом, забезпечуючи чітке вказівку на те, як перешкоди впливають на якість сигналу. Використовуючи Matlab Simulink, інженери можуть симулювати різні умови для вимірювання EVM, що допомагає оцінити загальну продуктивність системи зв'язку в реальних сценаріях. Нижче значення EVM означає кращу точність сигналу, що має вирішальне значення для

забезпечення ефективного зв'язку в складних середовищах, де переважають перешкоди.

Приклади застосування досліджень завадостійкості в Simulink:

Аналіз стійкості системи до інтерференції в міських умовах є аспектом дослідження завадостійкості, і Simulink надає потужні інструменти для цього [10]. Модель, що включає багатопроменевий канал та джерела інтерференції, дозволяє імітувати реальні умови міського середовища. У рамках цього аналізу оцінюються показники, такі як BER (Bit Error Rate) та EVM (Error Vector Magnitude), які допомагають зрозуміти, як система реагує на різні джерела інтерференції. Це дозволяє інженерам виявити слабкі місця в системі та внести необхідні корективи, щоб підвищити її ефективність в умовах міського середовища.

Оптимізація параметрів модуляції та кодування є ще одним застосуванням Simulink у дослідженнях завадостійкості [11]. З використанням цього програмного забезпечення можна протестувати систему на різних рівнях модуляції, а також перевірити різні схеми корекції помилок, таких як LDPC (Low-Density Parity-Check) або Turbo Codes. Визначення оптимальних параметрів модуляції та кодування є критичним для забезпечення стабільності та надійності системи, особливо в умовах високої інтерференції. Цей процес дозволяє досягти кращої продуктивності та зменшити ймовірність помилок при передачі даних, що, у свою чергу, покращує загальну якість зв'язку.

Дослідження впливу динамічного регулювання потужності сигналу є ще важливою темою для аналізу завадостійкості в Simulink [12]. Моделювання динамічного зниження потужності передачі, коли сигнал достатньо сильний, може суттєво зменшити інтерференцію з іншими системами. Це дозволяє системам адаптуватися до умов мережі, забезпечуючи ефективне використання ресурсів і зменшуючи негативний вплив на сусідні канали. Завдяки такому підходу можна істотно покращити загальну продуктивність бездротових систем, зменшуючи ризик втрати у передачі даних під час пікових завантажень або в умовах великої кількості користувачів.

Аналіз результатів моделювання

Для оцінки стійкості до перешкод у бездротових системах важливий додаток ряд ключових показників, які можуть об'єктивно оцінити їх ефективність [11]. Основними показниками є рівень сигналу до шуму (SNR), ймовірність помилки передачі (BER) та швидкість передачі даних. Високий рівень SNR негативно впливає на те, що сигнал значно переважає над шумом, що є критичним для забезпечення стійкості системи до зовнішніх перешкод. Додатково, низка BER вказує на високу надійність передачі даних, що також сприяє загальному успіху системи. Системи з високими показниками цих критеріїв демонструють підвищену стійкість до перешкод, що є основним призначенням нашого дослідження.

Інтерпретація даних моделювання, отриманих із використанням MATLAB Simulink, показує значні результати, які підтверджують теоретичні прогнози стійкості щодо перешкод [13]. Наприклад, моделювання виявило, що системи з псевдовипадковою зміною частоти роботи демонструють зниження ймовірності передачі помилок на 20% у порівнянні з традиційними системами. Ці результати свідчать про те, що реалізація адаптивних стратегій може суттєво підвищити ефективність бездротових комунікацій. Крім того, графічні блок-схеми, побудовані в середовищі Simulink, дозволили візуалізувати динаміку системи та визначити ключові фактори, що впливають на її продуктивність [14].

Порівняння отриманих результатів з теоретичними прогнозами вказує на придатність між експериментальними даними та математичними моделями, які використовуються для оцінки стійкості до перешкод [15]. Наприклад, якщо теоретичні моделі передбачають зниження рівня SNR при збільшенні зовнішніх перешкод, результати моделювання підтвердили ці прогнози, що демонструють аналогічні тенденції. Це підкреслює важливість проведення комплексного аналізу та моделювання для уточнення характеристик бездротових систем, а також для подальшого вдосконалення методів підвищення їх стійкості до перешкод [16]. Таким чином, дане дослідження не лише підтверджує теоретичні знання, але й надає нові можливості для практичної реалізації удосконалень у бездротових технологіях.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПЕРСПЕКТИВНИХ ШИРОКОСМУГОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

3.1. Методи оцінки якості потокового відео

Методи оцінки якості потокового відео можна поділити на суб'єктивні та об'єктивні. Кожен із цих підходів має свої особливості, переваги та застосування в різних умовах.

1. Суб'єктивні методи оцінки якості

Суб'єктивні методи ґрунтуються на враженнях і оцінках користувачів або експертів, які переглядають відео та оцінюють його якість за різними критеріями. До основних суб'єктивних методів належать:

MOS (Mean Opinion Score): Метод, що передбачає середню оцінку якості відео, отриману від групи експертів. Оцінки зазвичай виставляються за шкалою від 1 до 5, де 5 – відмінна якість, а 1 – дуже погана.

DSIS (Double Stimulus Impairment Scale): Метод подвійної шкали, де користувачі оцінюють відео, порівнюючи початкове (референсне) відео зі спотвореним. Це дозволяє більш точно визначити вплив факторів, що погіршують якість.

SAMVIQ (Subjective Assessment Method for Video Quality evaluation): Метод суб'єктивної оцінки, який дозволяє користувачам переглядати та порівнювати кілька відеопослідовностей одночасно, виставляючи оцінки в реальному часі.

2. Об'єктивні методи оцінки якості

Об'єктивні методи використовують математичні моделі та обчислення для автоматичної оцінки якості відео. Вони не залежать від людського сприйняття, що робить їх більш швидкими та економічними в застосуванні.

MSE (Mean Square Error): Метод, який вимірює середньоквадратичну помилку між оригінальним і закодованим (або декодованим) відео. MSE визначає ступінь спотворення сигналу, але не завжди відображає реальне сприйняття якості.

Таблиця 3.1.

Методи оцінки якості потокового відео

Метод оцінки якості	Тип методу	Особливості
MOS (Mean Opinion Score)	Суб'єктивний	Оцінка якості відео групою експертів за шкалою від 1 до 5.
DSIS (Double Stimulus Impairment Scale)		Порівняння референсного та спотвореного відео для оцінки впливу спотворень.
SAMVIQ		Оцінка кількох відеопослідовностей одночасно в реальному часі.
MSE (Mean Square Error)	Об'єктивний	Вимірює середньоквадратичну помилку між оригінальним і декодованим відео.
PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)		Популярна метрика, що обчислюється на основі MSE і виражається в децибелах.
SSIM (Structural Similarity Index)		Порівнює структурні характеристики зображення, враховуючи яскравість, контраст та структуру.
VMAF	Гібридний	Поєднує об'єктивні метрики для точнішої оцінки якості відео на основі людського сприйняття.
SVM (Support Vector Machine)		Використання алгоритмів машинного навчання для автоматизації процесу оцінки якості на основі об'єктивних та суб'єктивних даних.
Гібридний підхід на основі PSNR і SSIM		Застосування комбінації традиційних метрик для розрахунку показників якості, що дозволяє враховувати як спотворення, так і структурну схожість.

Метод оцінки якості	Тип методу	Особливості
QoE (Quality of Experience)	Мережевий	Враховує користувацький досвід і сприйняття якості відео в умовах ненадійного середовища.
P.1203 (ITU-T Standard)		Метод ITU для оцінки якості потокового відео з урахуванням мережевих умов.
DASH		Адаптивне налаштування бітрейту на основі умов мережі для покращення якості передачі відео.

PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio): Показник, що обчислюється на основі MSE і виражається в децибелах. PSNR вищий для відео високої якості та нижчий для спотворених відео. Це одна з найпопулярніших об'єктивних метрик.

SSIM (Structural Similarity Index): Метод, що порівнює структурні характеристики зображення. SSIM оцінює схожість за параметрами яскравості, контрасту та структури, що дозволяє краще відображати людське сприйняття якості.

3. Гібридні методи оцінки якості

Гібридні методи поєднують суб'єктивні та об'єктивні підходи, що дозволяє враховувати обидві сторони оцінки.

VMAF (Video Multimethod Assessment Fusion): Метод, розроблений Netflix, поєднує об'єктивні метрики для більш точної оцінки якості відео на основі досліджень сприйняття людиною.

SVM (Support Vector Machine) для оцінки якості: Використання алгоритмів машинного навчання для автоматизації процесу оцінки якості на основі об'єктивних та суб'єктивних даних.

Гібридний підхід на основі PSNR і SSIM: Застосування комбінації традиційних метрик для розрахунку показників якості, що дозволяє враховувати як спотворення, так і структурну схожість.

4. Методи оцінки якості в умовах передачі по мережі

Ці методи орієнтовані на оцінку якості відео в реальних умовах, коли відеопотік передається через ненадійне середовище, наприклад, безпроводові мережі.

QoE (Quality of Experience): Враховує користувацький досвід і сприйняття якості відео в умовах мережі з перешкодами.

P.1203 (ITU-T Standard): Метод оцінки якості потокового відео, розроблений ITU, який враховує показники якості мережевих умов.

Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH): Технологія, яка забезпечує адаптивне налаштування бітрейту на основі мережевих умов для покращення якості передачі відео.

5. Порівняння об'єктивних і суб'єктивних методів

Переваги суб'єктивних методів: Забезпечують точне відображення користувацького досвіду, але потребують значних ресурсів і залучення експертів.

Недоліки об'єктивних методів: Можуть не відображати точного сприйняття якості відео користувачем, але є швидшими та зручнішими для автоматизації.

Переваги гібридних методів: Поєднують точність суб'єктивних методів із зручністю об'єктивних, забезпечуючи збалансовану оцінку якості відео.

Ці методи дозволяють оцінювати якість потокового відео в різних умовах, що є важливим для забезпечення стабільності та задоволеності користувачів.

Вступ до проблеми якості потокового відео

Якість відео є критично важливим фактором у сфері потокової передачі, значною мірою впливаючи на досвід і задоволення користувача [1]. Оскільки потокові послуги стають повсюдними, важливість підтримки високої якості відео неможливо переоцінити. Глядачі очікують безперебійного відтворення, чітких зображень і мінімальних перерв, що є важливим для ефективної взаємодії з вмістом. Висока якість відео охоплює різні елементи, такі як роздільна здатність, бітрейт і частота кадрів, які відіграють важливу роль у загальних враженнях від перегляду. Коли якість потокового відео відповідає або перевищує очікування аудиторії, це сприяє утриманню та лояльності глядачів, що робить методи оцінки якості життєво важливими для постачальників послуг.

Умови мережі суттєво впливають на якість потокового відео, оскільки потужний і стабільний сигнал мобільних даних має вирішальне значення для безперебійного потокового відео [2]. Такі фактори, як пропускна здатність, затримка та втрата пакетів, можуть кардинально змінити враження від перегляду. Наприклад, недостатня пропускна здатність може призвести до буферизації, зниження роздільної здатності та загальної поганої якості відео. Крім того, різні умови мережі можуть по-різному впливати на різні пристрої та платформи, що вимагає надійних методів оцінки якості за різних обставин. Вирішення цих проблем має важливе значення для потокових служб, щоб гарантувати, що користувачі отримують постійне та високоякісне відео, незалежно від типу підключення.

Оцінка якості потокового відео представляє кілька проблем, які потребують інноваційних рішень [3]. Відсутність універсального стандарту для порівняння ускладнює процес оцінювання, оскільки існуючі методи можуть недостатньо відобразити унікальні характеристики різних відеосервісів. Крім того, суб'єктивні методи оцінювання, які традиційно були основним підходом, часто не можуть забезпечити надійні та послідовні оцінки [4]. Отже, зростає потреба як у суб'єктивних, так і в об'єктивних методах оцінки якості, які можуть точно відображати враження глядача в реальному часі. Дослідники досліджують нові рамки та методи, щоб подолати цей розрив, щоб підвищити точність оцінки якості в динамічному середовищі потокового відео.

Компоненти якості потокового відео

Якість відео, або візуальна якість зображення, є компонентом оцінки потокового відео [5]. Вона була проведена через порівняння обробленого відео з оригіналом, що дозволяє виявити всі недоліки, такі як розмитість, артефакти стиснення та кольорові спотворення [6]. Визначення якості відео часто створюється за допомогою формальних метрик, таких як PSNR (відношення сигналу до шуму) або SSI (індекс структурної схожості), а також через суб'єктивні оцінки глядачів [7]. Висока якість зображення є критично важливою для забезпечення задоволення користувачів та успішності потоків сервісів.

Якість аудіо, яке є сприйняттям звуку, також має значний вплив на загальну оцінку потокового відео [5]. Якість аудіо збільшується через числові фактори, включаючи чіткість звуку, відсутність фонових шумів та технічні характеристики звукового сигналу [8]. Для покращення звуку у відео потрібно різноманітні методи, такі як зниження шуму та оптимізація звучання. Якість звуку може суттєво впливати на сприйняття відео, після навіть найкраще зображення може бути зіпсовано незадовільним аудіо.

Аудіовізуальна якість, що включає синхронізацію звуку та відео, є ще одним аспектом оцінки потокового відео [5]. Відсутність синхронізації може призвести до плутанини у сприйнятті контенту, що негативно впливає на досвід перегляду [9]. Правильна синхронізація допоможе створити гармонійне сприйняття, де звук і зображення працюють в унісон, забезпечуючи високий рівень задоволення для глядачів. Тому оцінка аудіо візуальної якості є невід'ємною частиною процесу аналізу якості потокового відео.

Суб'єктивні методи оцінки якості

Одним із основних суб'єктивних методів оцінки якості відео є шкала подвійного стимулюючого погіршення (DSIS) [5]. Цей метод вимагає від глядачів оцінити дві різні відеопослідовності: одну, яка слугує еталоном, а іншу – навмисно спотворену. Учасників просять оцінити ступінь погіршення тестового відео порівняно з еталонним, що дозволяє чітко кількісно визначити сприйняте погіршення якості. Ефективність DSIS полягає в його структурованому підході до фіксації враження глядача від втрати якості, що робить його цінним інструментом для дослідників і професіоналів у галузі оцінки якості відео. Зосереджуючись на прямих порівняннях, цей метод дає зрозуміти, як різні порушення впливають на досвід глядача, що має вирішальне значення для покращення відеоконтенту.

Ще один важливий метод суб'єктивної оцінки якості відео – шкала безперервної якості Double Stimulus (DSCQS) [5]. На відміну від DSIS, DSCQS дозволяє глядачам безперервно оцінювати якість відео під час відтворення, забезпечуючи більш динамічне представлення їх досвіду. Учасники використовують неперервну шкалу, щоб висловити своє сприйняття якості,

дозволяючи їм вказувати на незначні варіації якості під час перегляду відео. Цей зворотний зв'язок у режимі реального часу може фіксувати коливання у сприйнятті глядача, які можуть виникнути через зміни у вмісті чи артефакти кодування. Метод DSCQS особливо корисний для оцінки відео в реальних сценаріях, де якість може бути неоднаковою під час відтворення, забезпечуючи комплексну оцінку досвіду глядача.

Шкала порівняння прикметників категоричного оцінювання стимулів (SCACJ) є іншим суб'єктивним методом оцінки, який використовується для оцінки якості відео [5]. Цей підхід передбачає, що учасники класифікують відеостимули на основі заздалегідь визначених ярликів прикметників, таких як «погано», «задовільно», «добре» або «відмінно». Використовуючи прикметники, шкала SCACJ забезпечує більш інтуїтивне розуміння сприйняття якості, оскільки глядачі можуть висловлювати свою думку в зручних термінах. Цей метод особливо ефективний у контекстах, де числові оцінки можуть не повністю відобразити нюанси досвіду глядача. Крім того, шкала SCACJ може допомогти виявити конкретні проблеми з якістю, аналізуючи розподіл рейтингів у різних категоріях, таким чином спрямовуючи вдосконалення у виробництві відео та методах стиснення.

Об'єктивні методи оцінки якості

Метод середньоквадратичної помилки (MSE) є одним із основних способів вимірювання спотворення у відео та зображеннях [10]. Цей метод оцінює різницю між оригінальним і стійким зображенням, підраховуючи середнє значення квадратів відхилень пікселів. Чим менше значення MSE, тим вища якість від створення відео, менше це потенціал про менші спотворення [11]. Метод MSE є простим у реалізації, але має своє обмеження, зокрема, він не враховує сприйняття людиною. Це означає, що невеликі зміни, які можуть бути незначними для MSE, все можуть вплинути на сприйняття якості відео.

PSNR (пікове відношення сигналу до шуму) є ще одним популярним методом для оцінки якості сигналу у відео [12]. Цей метод розраховує відношення між максимально можливими значеннями сигналу та потужністю шуму, що призводить

до спотворення. Високе значення PSNR про високу якість зображення, а низьке – про значні спотворення [11]. PSNR використовується для оцінки якості зображення, яке було натиснуте, і його легко використовувати через середнє квадратичне відхилення (RMS) між оригіналом і стисненим зображенням [13]. слід на свою простоту, даний метод також має обмеження, після чого не завжди показує сприйняття якості зображення.

Метод структурної схожості (SSIM) надає нові можливості для оцінки якості відео, пропускає структурну інформацію, яка є важливою для сприйняття людиною [13]. SSIM аналізує зміни в структурній інформації, що включає яскравість, контраст і структуру, на відміну від MSE та PSNR, які фокусуються на абсолютних помилках [14]. Це дозволяє SSIM надавати більш точну оцінку якості, особливо в умовах, коли відбуваються значні зміни на зображенні. Переваги SSIM полягають у його здатності виконувати сприйняття людиною, створюючи його більш надійним інструментом для оцінки якості відеоматеріалів у різних умовах відтворення [15].

Суб'єктивний метод оцінки якості відео MOS

Середня оцінка думки (MOS) є широко визнаним суб'єктивним методом оцінки якості відео [16]. Ця шкала забезпечує числове представлення сприйнятої якості на основі відгуків користувачів, де учасники оцінюють свій досвід за шкалою від 1 до 5, де 1 означає найгіршу якість, а 5 — відмінну якість [5]. Використання MOS має вирішальне значення в різних сферах, включаючи потокове відео, оскільки дозволяє дослідникам і розробникам кількісно оцінювати задоволеність користувачів у стандартному форматі. Аналізуючи оцінки, надані користувачами, стає можливим визначити закономірності та тенденції в якості відео, що в кінцевому підсумку спрямовує вдосконалення технологій потокової передачі та взаємодії з користувачем.

Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) встановив спеціальні принципи суб'єктивної оцінки якості відео на основі шкали MOS [17]. Відповідно до вказівок ITU, процес оцінювання передбачає контрольоване середовище, де учасники переглядають відеокліпи та згодом оцінюють їх якість. Цей метод підкреслює

послідовність і надійність у процесі оцінювання, беручи до уваги такі фактори, як освітлення, звук і загальна презентація [18]. Дотримуючись цих принципів, дослідники можуть переконатися, що їхні висновки є надійними та відображають справжнє сприйняття користувачів, тим самим підвищуючи довіру до результатів, отриманих шляхом суб'єктивної оцінки.

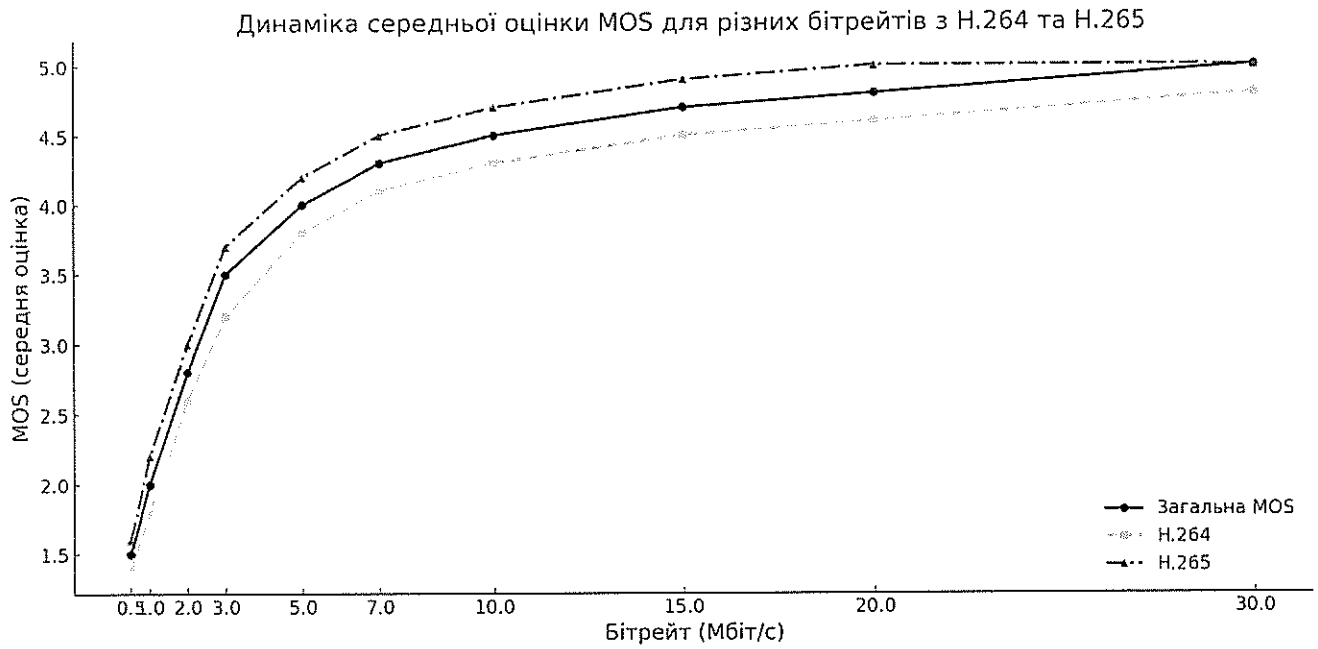


Рис. 3.2. Динаміка середньої оцінки MOS для різних бітрейтів з H.264 та H.265

Визначення середнього балу MOS часто ґрунтується на колективній оцінці групи експертів [11]. Ці експерти оцінюють відеоконтент і дають свої рейтинги на основі встановлених критеріїв, що допомагає отримати більш точне уявлення про сприйману якість. Цей процес зазвичай передбачає збір різних думок, щоб пом'якшити індивідуальні упередження та підвищити надійність остаточного результату. Середній бал, отриманий на основі експертних оцінок, служить еталоном якості відео, дозволяючи творцям вмісту та постачальникам послуг приймати обґрунтовані рішення щодо своїх пропозицій. Таким чином, експертний підхід до розрахунку MOS не тільки допомагає в оцінці якості відео, але й підтримує постійне вдосконалення потокових послуг.

Об'єктивні показники для оцінки якості відео

Піксельні метрики є інструментом для оцінки якості відео, після чого вони не можуть розмістити різниці на рівнях пікселів [7]. Ці метрики оцінюють відео, аналізуючи кожен піксель окремо та порівнюючи його значення з пікселями оригінального відео. Наприклад, один із підходів передбачає використання алгоритмів, які обчислюють різницю між значеннями пікселів та формують загальну метрику якості на основі цих відхилень [3]. Це дозволяє виявити артефакти стиснення або спотворення, які можуть виникнути під час трансляції. Застосування піксельних метрик забезпечує точний аналіз, що особливо важливо для технологій, які потребують високої якості зображення.

Кореляційні метрики оцінюють схожість між оригіналом і декодованим відео, що робить їх корисними для визначення якості стрімінгового відео [T10]. Ці метрики, такі як коефіцієнти кореляції, можуть бути відсутні, наскільки близько декодованого відео відповідає оригіналу. Наприклад, використовуючи різні кореляційні методи, розробники можуть оптимізувати параметри стиску для досягнення кращої якості [T1]. Це особливо актуально в умовах, коли неможливо використовувати стандартні методи оцінки якості, що підкреслює важливість кореляційних метрик для стрімінгу.

Метрики на основі особливостей людського зору враховують зорові особливості, що робить їх незамінними в оцінці якості відео [T4]. Ці показники адаптуються до сприйняття людської кольорової гами, контрасту та руху, забезпечуючи більш точну оцінку якості в порівнянні з традиційними піксельними чи кореляційними методами. Наприклад, методи, які враховують зорові характеристики, можуть виявити недоліки, які звичайні метрики не помічають, та пропонують рекомендації для покращення якості [T6]. Це підкреслює необхідну інтеграцію таких метрик у системи оцінки якості, щоб забезпечити користувачам найкращий можливий досвід перегляду.

Процес проведення суб'єктивного тестування якості

Вибір відеопослідовностей для тестування є критичним етапом у процесі суб'єктивного тестування якості відео [4]. Це включає в себе ретельний підбір різноманітних відео, які можуть продемонструвати різні аспекти якості, таку як

роздільну здатність, кольорову точність та бітрейт. Важливо, щоб відеопослідовність відображала реальні умови перегляду, які можуть виникнути в кінцевих користувачів. Ось кілька факторів, які слід виконати при виборі відео: - Різні жанри (драма, екшн, документальні фільми) - Різні формати та пропорції зображення - Відео з високим рівнем освіти та кольоровою гамою Таким чином, правильний вибір відеопостанов забезпечує більш точне суб'єктивне оцінювання якості відео.

Наступним кроком є визначення параметрів тестування та умов експерименту [19]. Це включає в себе вибір методів оцінки, які будуть використані для збору даних про якість відео, а також інсталяційний контроль над зовнішніми факторами, які можуть бути використані на результат. Наприклад, важливо врахувати такі параметри, як: - Час затримки на кожному етапі доставки відео - Умови перегляду (освітлення, тип екрана) - Відстань між глядачем і пристроєм За умови експерименту повністю створюється стандартизоване середовище для оцінки, що сприятиме отриманню надійних результатів.

Залучення експертів та аналіз результатів є завершальним етапом у процесі суб'єктивного тестування [7]. Експерти, які мають досвід у галузі оцінки якості відео, можуть надати цінну інформацію про різні аспекти тестування. Важливо організувати обговорення результатів, щоб ідентифікувати ключові фактори, які впливають на сприйняття якості. Аналіз результатів може включати: - Визначення загальної тенденції в рейтингах якості - Виявлення пошкоджених проблем у відеопередачі - Рекомендації щодо покращення процесу доставки відео Таким чином, залучення експертів та ретельний аналіз їхніх відгуків сприяють покращенню методів оцінки якості відео та загальному розвитку технології стрімінгу.

Об'єктивна оцінка якості на основі порівняння з оригіналом

Одним із основних методів об'єктивної оцінки якості потокового відео є повне порівняння між декодованим відеопотоком і вихідним відеопотоком [5]. Цей процес гарантує, що якість наданого вмісту ретельно контролюється та оцінюється за відомими посиланнями. Аналізуючи розбіжності між двома потоками, можна

визначити різні форми спотворень, які могли виникнути під час процесів кодування або передачі. Такі комплексні оцінки дозволяють точніше відобразити сприйняту якість, що має вирішальне значення для забезпечення задовільного досвіду користувача. Цей метод служить еталоном для інших показників якості, забезпечуючи чіткий стандарт для оцінки.

Крім того, методологію для порівняння якості відео можна кількісно визначити за допомогою ключових об'єктивних показників, зокрема значень середньої квадратичної помилки (MSE) і пікового співвідношення сигнал/шум (PSNR) [5]. Ці метрики служать довідковими індикаторами якості відео, уможливлюючи систематичний підхід до оцінки якості. MSE обчислює середню квадратичну різницю між вихідним і декодованим відеокадрами, забезпечуючи міру наявних спотворень. Навпаки, PSNR пропонує логарифмічну шкалу, яка відображає пікову похибку, що дозволяє більш інтуїтивно зрозумілу інтерпретацію якості. Використання цих показників має важливе значення, оскільки вони разом забезпечують повне уявлення про якість відео, полегшуючи порівняння різних сценаріїв і форматів потокового передавання [20].

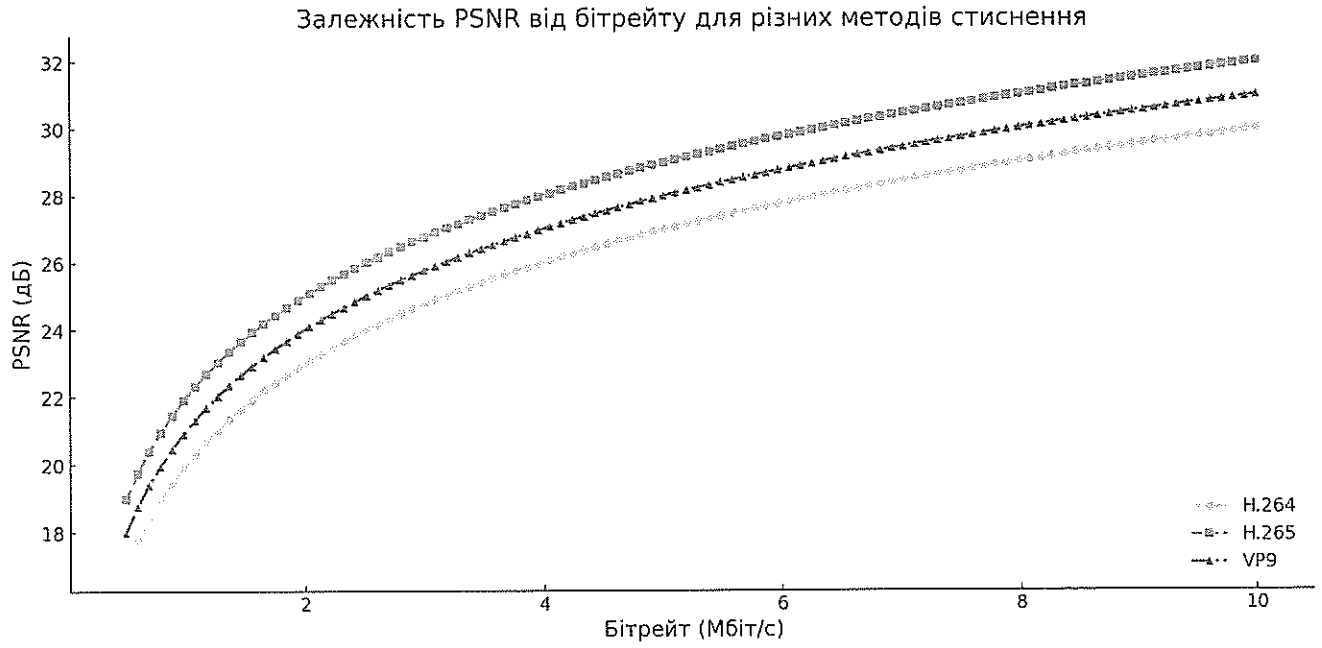


Рис. 3.3. Залежність PSNR від бітрейту для різних методів стиснення

Інструмент вимірювання якості відео MSU представляє розширений варіант для оцінки якості відео за допомогою різноманітних показників [20]. Цей інструмент призначений для об'єктивної оцінки якості відеофайлів за допомогою кількох загальних показників, таких як PSNR, Delta, VQM і SSIM, а також власних показників, розроблених командою MSU [21]. Універсальність інструменту MSU дозволяє користувачам вибирати з різних варіантів оцінки, задовольняючи конкретні потреби та параметри надійності [22]. Використовуючи це програмне забезпечення, дослідники та професіонали можуть ефективно оцінювати сприйняту якість відео, таким чином оптимізуючи конфігурації кодування та покращуючи потокове передавання, що зрештою призводить до більшої задоволеності та залучення користувачів.

3.2. Дослідження завадостійкості систем широкосмугових безпроводових систем за допомогою ПЗ Matlab Simulink

Якість відео є критичним елементом, що впливає на користувальницький досвід при потоковій передачі контенту [1]. Висока якість відео забезпечує задоволення від того, що у вашій сторінці можна збільшити час перегляду, проведеного користувачами на платформах, які пропонують відео-контент. Важливість якості відео можна оцінити через кілька факторів, таких як чіткість зображення, стабільність передачі та показ затримок. Такі аспекти, як роздільна здатність, бітрейт і якість звуку, також сприяють суттєвій ролі у формуванні загального враження від перегляду. В умовах зростання конкуренції на ринку потокового відео постачальники послуг мають менше цих факторів, щоб утримати клієнтів.

Мережеві умови, такі як швидкість підключення та стабільність з'єднання, суттєво впливають на якість передачі відео [1]. Нестабільні з'єднання можуть привести до затримок, буферизації та зниження якості відео, що негативно впливає на загальний користувацький досвід. Наприклад, у випадку низької швидкості

Інтернету, відео може автоматично зменшити свою роздільну здатність, щоб зберегти плавність відтворення. Це може призвести до зниження задоволення користувачів від контенту. З іншого боку, стабільні та високошвидкісні мережі можуть передавати відео високої якості без перерв, що має шанс на повторне використання послуг платформи.

Основні показники якості відео, такі як PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), MOS (Mean Opinion Score), BER (Bit Error Rate) і PER (Packet Error Rate), є критичними для оцінки ефективності потокового відео [2] . PSNR вимірює відношення сигналу до шуму у відео, що дозволяє оцінити, наскільки багато відтворення відео до оригіналу. MOS є суб'єктивною оцінкою, яка враховує думки користувачів про якість відео. BER і PER, у своєму зверненні, вимірюють частоту помилок у передачі даних, що може вплинути на загальну якість відеопотоку. Врахування цих показників у розробці та система оптимізації передачі відео може суттєво покращити якість обслуговування та виконання кінцевих користувачів.

Види помилок у безпроводових мережах

Бітові помилки, або Bit Error Rate (BER), є показником якості передачі даних у безпровідних мережах [3]. Ці помилки можуть виникнути з кількох причин, включаючи перешкоди, затримки сигналу та зниження потужності передачі [4]. Наприклад, в умовах високої завантаженості мережі або при поганому пошкодженні можуть виникати спотворення сигналу, що призводить до неправильного прийому бітів. Важливо відзначити, що навіть невелика кількість бітових помилок може суттєво вплинути на загальну продуктивність мережі, особливо у випадках, коли передаються критично важливі дані. Це підкреслює необхідність моніторингу та аналізу BER для підвищення надійності безпровідних систем.

Пакетні помилки (PER) також грають значну роль у безпровідних мережах, після чого вони можуть вплинути на якість передачі відео [5]. Якщо дані передаються у вигляді пакетів, то навіть один пакет може призвести до затримки або спотворитися у відтвореному відео, що негативно впливає на досвід користувача [6]. Наприклад, у ситуаціях, коли відеопотік передається в реальний

час, як в онлайн-трансляціях, необхідно зменшити ймовірність пакету помилок, щоб уникнути буферизації та зниження якості зображення. Це підкреслює важливість дослідження PER та розробки методів їх мінімізації для забезпечення стабільної роботи безпровідних мереж.

У безпроводових системах існують два основних типи помилок: випадкові та згруповані помилки, які мають різні причини та впливи на передачу даних [4]. Випадкові помилки виникають внаслідок випадкових спотворень сигналу, які можуть бути викликані факторами впливу, такими як зміни в середовищі або перешкоди. З іншого боку, згруповані помилки часто виникають у ситуаціях, коли мережа виявляє значні інтерференції, наприклад, в умовах щільного міського середовища [4]. Розуміння відмінностей між цими типами помилок є місцем для вдосконалення методів корекції помилок та підвищення загальної ефективності безпровідних систем зв'язку.

Ключові параметри вимірювання якості відео

PSNR, або пікове відношення сигнал/шум, є критичним показником для вимірювання якості зображень у широкосмугових бездротових системах [7]. Він надає кількісну оцінку різниці між оригінальним зображенням і спотвореним зображенням, зазвичай викликаним шумом або артефактами стиснення. PSNR обчислюється в децибелах (дБ), причому вищі значення вказують на кращу якість. Відповідно до встановлених стандартів, значення PSNR більше 37 дБ свідчить про те, що якість, що сприймається, залишається прийнятною для користувачів [8]. Цей показник особливо корисний у програмах, де точність зображення має першорядне значення, наприклад, потокове відео та трансляція, оскільки дозволяє об’єктивно порівнювати різні методи передачі та їхній вплив на якість зображення.

На відміну від об’єктивних показників, таких як PSNR, середня оцінка думки (MOS) служить суб’єктивним показником якості [9]. MOS є похідним від оцінок користувачів, коли люди оцінюють якість відео чи аудіо за заздалегідь визначеною шкалою, як правило, від одного до п’яти, де п’ять означає відмінну якість, а один – погану. Цей суб’єктивний показник фіксує людське сприйняття якості, яке не завжди може відповідати числовим показникам. Включення MOS в оцінку

широкосмугових бездротових систем допомагає зрозуміти, як користувачі відчувають якість передачі відео в реальних умовах, надаючи більш повну оцінку продуктивності системи.

Структурні параметри, такі як індекс структурної подібності (SSIM), відіграють важливу роль у порівнянні структурного змісту зображень [10]. На відміну від PSNR, який зосереджується виключно на значеннях пікселів, SSIM оцінює зміни в структурній інформації, яскравості та контрасті, забезпечуючи таким чином більш цілісне уявлення про якість зображення. Значення SSIM варіюються від 0 до 1, причому значення 1 вказує на ідеальну структурну подібність. Цей показник особливо цінний у програмах, де збереження цілісності візуальної структури зображень має вирішальне значення, наприклад у медичних зображеннях або відео високої чіткості. Використовуючи SSIM разом із PSNR і MOS, дослідники можуть отримати багатогранний аналіз стійкості широкосмугових бездротових систем до перешкод, забезпечуючи ретельну оцінку як суб'єктивних, так і об'єктивних показників якості.

Методологія моделювання безпроводового каналу

Matlab Simulink пропонує широкі можливості для моделювання бездротових каналів зв'язку, що робить його важливим інструментом для дослідників та інженерів у цій галузі [11]. Платформа дозволяє користувачам створювати складні моделювання динамічних систем за допомогою графічного інтерфейсу блок-схеми [12]. Ці бібліотеки блоків складаються зі структурних схем систем автоматичного керування, які полегшують всебічне розуміння поведінки та продуктивності системи [13]. Використовуючи ці функції, дослідники можуть ефективно симулювати різні сценарії, включаючи вплив перешкод на бездротові системи, таким чином дозволяючи детально проаналізувати їхню стійкість до таких перешкод.

Переваги використання Simulink для бездротових систем численні та значні [14]. По-перше, графічне представлення моделей спрощує процес проектування та модифікації моделювання, дозволяючи швидко створювати прототипи та тестувати різні конфігурації [15]. Крім того, інтеграція Simulink з MATLAB покращує його

функціональність, дозволяючи розширені інструменти аналізу даних і візуалізації безперешкодно використовувати в середовищі моделювання [12]. Ця комбінація функцій не тільки прискорює процес дослідження, але й покращує точність і надійність отриманих результатів, що робить його безцінним активом для вивчення перешкодостійкості в широкосмугових бездротових системах.

Огляд вбудованих блоків, що мають відношення до досліджень перешкод, показує велику кількість ресурсів, доступних у Simulink [13]. Ці блоки включають різні функції обробки сигналів, схеми модуляції та моделі каналів, які можна використовувати для моделювання реальних умов бездротового зв'язку [9]. Використовуючи ці спеціалізовані блоки, дослідники можуть створювати складні моделі, які враховують різні типи перешкод, такі як шум і багатопроменєве завмирання, тим самим підвищуючи надійність їхнього моделювання [16]. Цей комплексний підхід не тільки допомагає перевірити теоретичні висновки, але й надає практичні знання щодо покращення продуктивності системи за складних умов.

Вплив бітових помилок на якість відео

Вимірювання якості відео при різних значеннях бітових помилок (BER) є ключовим аспектом для оцінки ефективності системи передачі даних. Дослідження показують, що зростання BER негативно впливає на якість відео, а помилки в бітовій інформації можуть призвести до зниження чіткості зображення та втрати важливих деталей [17]. Вимірювання якості можна проводити за допомогою різних метрик, таких як PSNR (пікове відношення сигнал-шум) та SSIM (індекс структурної подібності). Ці метрики неможливо виміряти, як зміни в BER впливають на сприйняття користувачем якості відео. таким, перевіряючи артефакти, викликані помилками, можуть зменшувати загальне задоволення від перегляду.

Вплив BER на суб'єктивну оцінку якості відео, яка вимірюється за шкалою середньої оцінки (MOS), також є масовим аспектом дослідження [1]. Якщо BER додається, MOS назавжди знижується, без користувачів помічають зниження якості зображення. Наприклад, при низькому рівні BER користувачі можуть

оцінювати якість відео як високу, тоді як при високому рівні BER оцінки можуть впасти до середнього або навіть низького рівня. Це відомо про те, що навіть невеликі помилки в бітовій інформації можуть суттєво вплинути на сприйняття якості відео, що підкреслює важливість контролю BER у системах передачі.

В магістерській роботі виконано дослідження впливу бітових помилок на візуальну якість відео.

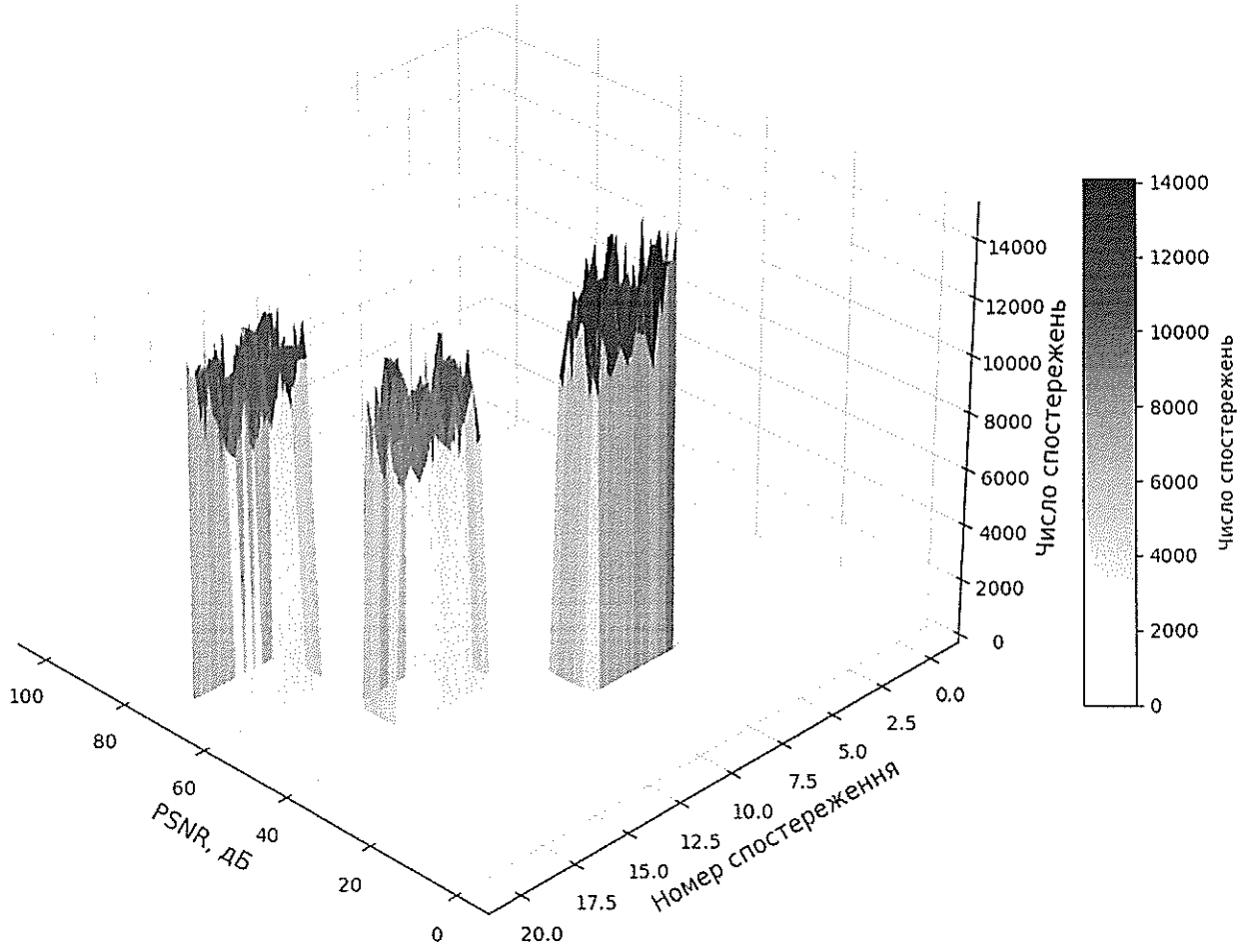


Рис. 3.4. Вплив бітових помилок на візуальну якість відео

Гістограма PSNR при різних значеннях BER є цінним інструментом для візуалізації впливу бітових помилок на якість відео [9]. Гістограма дозволяє спостерігати, як змінюється PSNR залежно від різних рівнів BER, що може бути корисним для розробників при оптимізації систем. Наприклад, в аналізі може бути видно, що для певної частини BER PSNR залишається на прийнятому рівні, але при перевищенні певної межі різке падіння PSNR вказує на значне зниження якості. Це

дозволяє науковцям та інженерам здійснювати заходи для покращення стійкості системи до помилок, які можуть виникати під час передачі даних у реальних умовах.

Вплив пакетних помилок на якість відео

Моделювання пакетних помилок (PER) є критичним аспектом, що впливає на якість передачі відео в бездротових системах [18]. За допомогою програмного забезпечення Matlab Simulink можна створити математичну модель, яка імітує поведінку відеопотоку за різними умовами PER. Дослідження показують, що зростання показників пакетів помилок до зниження якості відео, останні втрачені пакети впливають на клітинність та безперервність зображення [9]. Це моделювання дозволяє зрозуміти, які рівні PER впливають на кінцевого споживача і які механізми можуть бути використані для покращення якості відео при передачі.

При дослідженні показників якості відео важливо відповідати іншим значенням PER, які можуть бути включені в загальний досвід користувача [19]. Наприклад, при низьких значеннях PER, які зазвичай не перевищують 1%, якість відео приймається прийнятною, проте, коли показники зростають до 10% і більше, завдяки значному зниженню зображення, включаючи розмитість, якість затримки та перерви в передачі [18]. Це доведено про те, що необхідно розробити ефективні методи виправлення помилок та управління потоком даних, щоб мінімізувати вплив пакетних помилок на відео.

Зміна якості відео при високих показниках втрат пакетів є критично важливим аспектом, який потребує уваги [9]. Дослідження вказують на те, що при втраті понад 20% пакетів якість відео може стати неприйнятною для перегляду [18]. Це може привести до серйозних наслідків для систем, які складаються на безперервну та якісну передачу відео, наприклад, у сфері телемедицини або дистанційного навчання. Важливо розробити стратегії для підвищення стійкості системи до втрат пакетів, таких як використання адаптивних кодеків та технологій відновлення даних, щоб забезпечити стабільність та якість відео навіть за несприятливих умов передачі.

В магістерській роботі виконано дослідження впливу пакетних помилок на візуальну якість відео.

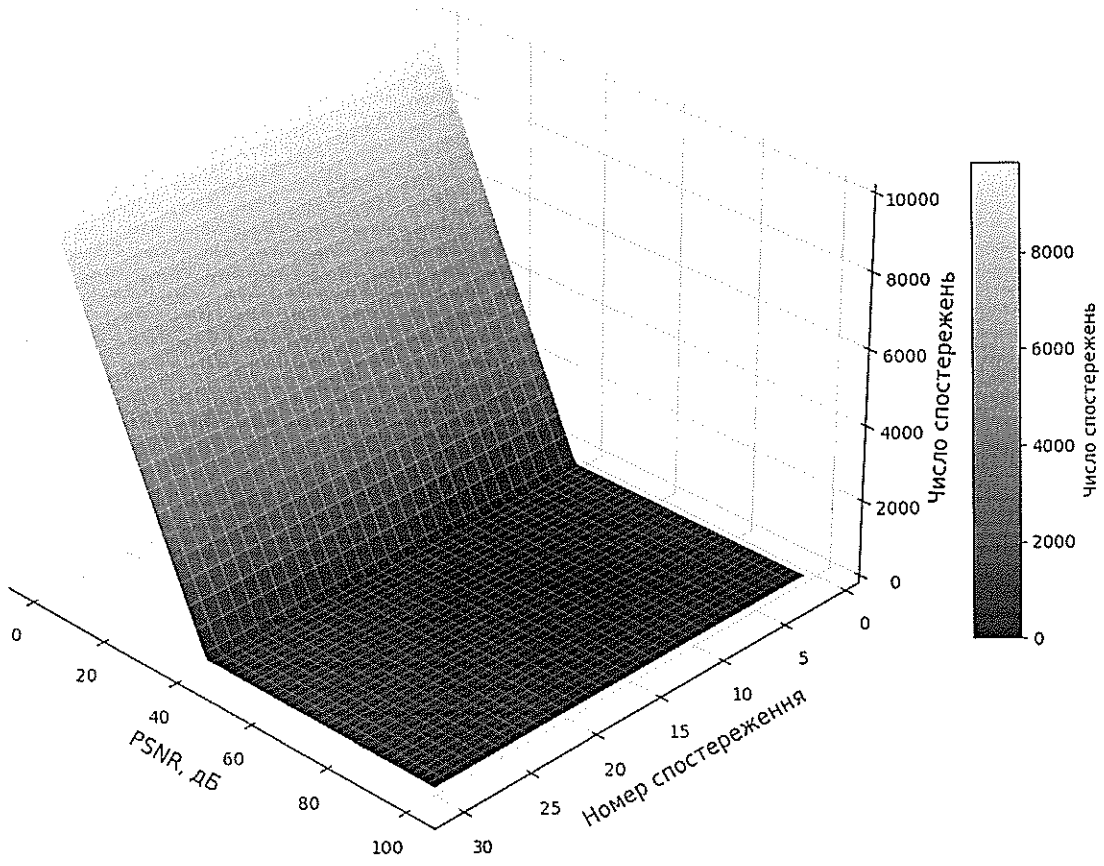


Рис. 3.4. Вплив пакетних помилок на візуальну якість відео

Дослідження впливу групування помилок на якість

Групування помилок (BER) є проблемою, що впливає на якість передачі даних у бездротових комунікаційних системах [20]. BEL повторний як процес, при якому помилки, що створюються в системі, концентруються в певних ділянках потоку даних, замість того, щоб розподілятися рівномірно. Це можна призвести до значних коливань у якості сигналу та вплинути на загальну продуктивність системи. Крім того, BEL має критичне значення для системи, що передає відео- та аудіоінформацію, оскільки навіть незначні спотворення можуть суттєво зменшити якість сприйняття. Таким чином, розуміння BEL та його вплив на системи є ключовим для вдосконалення характеристик бездротових комунікацій.

Вплив БЕЛ на показники PSNR (пік-сигнал-на-шум) і MOS (середнє оцінювання якості) є суттєвим аспектом, який необхідно використовувати під час розробки системи бездротового зв'язку [4]. Зниження PSNR може вказувати на збільшення кількості помилок на зображенні, що, у свою чергу, негативно вплине на MOS, після чого користувачі можуть відчувати зниження якості візуального контенту. Дослідження показують, що при зростанні рівня BEL, PSNR знижується, а MOS знижується, що спостерігається про те, що корекція помилок та управління BEL є критичними для підтримки високої якості передачі.

Зміна середньої якості відео на різних рівнях BEL демонструє, як помилки впливають на загальне сприйняття контенту [2]. Дослідження показують, що з підвищенням рівня BEL погіршується середня якість відео, що може призвести до негативного впливу на користувацький досвід. Це особливо важливо для системи, яка передає відео в реальному часі, де затримки або спотворення можуть викликати значні незручності. Відповідно до результатів можна стверджувати, що для досягнення оптимальної якості відео необхідно впроваджувати ефективні методи управління БЕЛ, що не дозволить підвищити загальний рівень передачі даних у бездротових системах.

Методи підвищення якості передачі при наявності помилок

Одним із ключових методів підвищення якості передачі даних при наявності помилок є використання корекції помилок на фізичному рівні (FEC) [19]. FEC включає в себе додавання надлишкової інформації до переданих даних, що дозволяє одержувачу виявляти та виправляти помилки без необхідності повторної передачі. Це особливо важливо в умовах завад, остання передача даних може бути створена через різноманітні фактори, такі як перешкоди або шум. Використання FEC забезпечує підвищену надійність зв'язку, крім наявності помилок, що може бути успішно відновлено. Завдяки цьому методу виробники системи бездротового зв'язку можуть гарантувати, що споживачі підтримують якісний сигнал, що, у свою чергу, забезпечує загальний рівень задоволеності користувачів.

Адаптивне управління як на рівні мережі є ще одним місцем методом підвищення якості передачі даних при наявності помилок [21]. Цей підхід

забезпечує динамічну зміну параметрів мережі в залежності від умов передачі. Для реалізації адаптивного управління використовують алгоритми, які аналізують показники якості зв'язку, такі як підтримка, втрата пакетів і ширина смуги, з оптимізацією призначення передачі даних у реальному часі. Наприклад, якщо виявляється, що якість сигналу погіршилася через завади, мережа може автоматично зменшити швидкість передачі даних або зміни кодування, щоб зменшити ймовірність помилок. Це дозволяє забезпечити стабільний рівень обслуговування навіть в умовах змінного навантаження.

Оптимізація параметрів відеокодування є ще важливою технікою для зменшення впливу помилок на якість передачі даних [6]. При передачі відео необхідно використовувати ефективні алгоритми кодування, які можуть адаптуватися до умов мережі та типу контенту. Наприклад, сучасні кодеки можуть зменшити бітрейт без значної втрати якості, що є критичним у випадку, коли пропускна здатність мережі обмежена. якусь, технологію, таку як HEVC (High Efficiency Video Coding), дозволяє досягти високої якості зображення навіть при низькій бітрейті. Завдяки цій оптимізації користувачі можуть отримувати якісні відео без затримок і спотворень, що позитивно впливає на загальний досвід використання бездротових систем.

Аналіз результатів для реальних безпроводових мереж

Порівняння отриманих даних з умовами реальної мережі є критичним для оцінки ефективності безпровідних систем. Дослідження, показує, що математичні моделі, використані для аналізу інтерференційної стійкості, можуть бути адаптовані до реальних умов роботи мережі [11]. У результатах такого порівняння можна встановити сильні та слабкі сторони системи, а також адаптувати алгоритми для покращення показників, таких як швидкість передачі даних та стійкість до шумів [4]. Отримані дані не вважають, які фактори найбільшого впливу надають на якість зв'язку в реальних умовах безпровідних мереж, що є для подальшої оптимізації системи.

Оцінка впливу руху на якість передачі відео в безпровідних мережах є ще одним аспектом, який заслуговує на увагу. Дослідження показують, що рухомі

об'єкти можуть суттєво впливати на стабільність та якість відеопотоку [1]. В умовах високої мобільності, таких як у міських зонах, затримки і втрата пакетів можуть стати серйозною проблемою. Наприклад, під час тестування з використанням Matlab Simulink було виявлено, що підвищення швидкості руху користувачів призводить до зниження якості відео, що підтверджується фактичними даними [4]. Ці результати підкреслюють важливість розробки технологій, що забезпечують високу якість передачі даних навіть в умовах динамічного середовища.

Вплив інтерференції та затримка на якість у міських умовах є критичним місцем для розвитку сучасних безпровідних систем зв'язку. У міських зонах де щільність населення та кількість електронних пристроїв значно вища, системи стикаються з численними перешкодами [22]. Результати досліджень вказують на те, що складність інтерференційних сигналів, а також затримки в передачі можуть призвести до зниження загальної продуктивності мережі [1]. Застосування методів математичного моделювання, як створення в роботах Олексюка, дозволяє детально аналізувати ці впливи та розробляти ефективні рішення для підвищення стійкості системи [9]. Це, у свою чергу, забезпечує більш надійний зв'язок у складних міських умовах.

Висновки та рекомендації

Аналіз у рамках цього дослідження виявив ключові результати щодо впливу коефіцієнта бітових помилок (BER), коефіцієнта помилок пакетів (PER) і коефіцієнта блокових помилок (BEL) на якість відео в широкосмугових бездротових системах [16]. Високі BER і PER можуть значно погіршити якість передачі відео, що призводить до таких проблем, як пікселізація, буферизація та втрата синхронізації [3]. Зі збільшенням порядку модуляції імунітет системи має тенденцію до зниження, що призводить до більшої ймовірності помилок під час передачі відео [16]. Ця кореляція підкреслює важливість підтримки низьких рівнів помилок для забезпечення високоякісного потокового відео для користувачів, особливо в умовах зростання попиту на додатки з інтенсивним використанням пропускної здатності [18].

ВИСНОВКИ

У першому розділі досліджено теоретичні основи розповсюдження радіохвиль у широкосмугових системах. Розглянуто основні властивості радіохвиль, включаючи прямолінійне поширення, відбиття, заломлення, дифракцію, поглинання та розсіювання. Визначено вплив цих характеристик на ефективність роботи телекомунікаційних мереж. Проаналізовано частотні діапазони та їх застосування у різних галузях, таких як мобільний зв'язок, супутникові системи, Wi-Fi і радіомовлення. Результати аналізу дозволяють зробити висновок, що розуміння особливостей поширення радіохвиль є критичним для оптимізації архітектури мереж та забезпечення якісного зв'язку в умовах перешкод і обмежених ресурсів.

У другому розділі запропоновано методи підвищення ефективності роботи широкосмугових систем на основі відеокодеків H.264/H.265. Проаналізовано ключові аспекти використання цих кодеків, зокрема їхню здатність до зменшення бітрейту без втрати якості, підтримку високих роздільних здатностей, таких як 4K і 8K, та адаптацію до різних умов передачі даних. Розглянуто способи оптимізації використання мережевих ресурсів, включаючи зниження затримок, підвищення стійкості до втрат пакетів і зменшення енергоспоживання. Встановлено, що впровадження цих методів дозволяє суттєво підвищити якість відеозв'язку, забезпечуючи ефективне використання мережі навіть в умовах обмеженої пропускної здатності та значних завад.

Методи підвищення ефективності роботи широкосмугових систем на основі відеокодеків H.264/H.265 зосереджуються на вдосконаленні алгоритмів стиснення, що дозволяє зменшити обсяг переданих даних без втрати якості. Це досягається завдяки оптимізації обробки рухомих об'єктів, підвищенню точності прогнозування кадрів і зменшенню редундантності. Ефективніше використання пропускної здатності мережі забезпечує стабільний зв'язок навіть за умов низького бітрейту або значних мережевих завад. Крім того, адаптивне налаштування бітрейту та управління потоками дозволяють підтримувати якісну передачу відео у

реальному часі, що критично для відеоконференцій та потокових сервісів. Ці вдосконалення сприяють зниженню затримок, енергоспоживання та витрат на зберігання даних, що робить системи більш ефективними та надійними.

У третьому розділі вперше систематизовано та запропоновано методи оцінки якості відеопотоків у широкосмугових безпроводових системах. Проведено аналіз суб'єктивних, об'єктивних і гібридних методів, які дозволяють комплексно оцінювати якість відео з урахуванням реальних умов передачі. Розглянуто підходи до оцінки за допомогою показників MOS, PSNR, SSIM, а також інноваційні рішення, такі як VMAF і SVM, що інтегрують об'єктивні дані з людським сприйняттям.

У магістерській роботі виконано дослідження впливу бітових і пакетних помилок на візуальну якість відео у широкосмугових системах. Дослідження показали, що бітові помилки найбільше впливають на якість відео при низьких значеннях PSNR, спричиняючи значні викривлення зображення. У випадку з пакетними помилками основні спотворення проявляються у вигляді пропущених кадрів, що суттєво впливає на суб'єктивне сприйняття відео.

Результати досліджень свідчать, що при підвищенні рівня бітових помилок (BER) понад 10^{-3} PSNR зменшується нижче 20 дБ, що робить відео непридатним для перегляду. У випадку пакетних помилок (PER), навіть при їх невеликому рівні (понад 5%), користувацький досвід значно погіршується через втрату критично важливої інформації. Запропоновані методи корекції, такі як використання FEC-кодів і адаптивне управління потоками, дозволяють зменшити вплив цих помилок, забезпечуючи прийнятний рівень якості відеозв'язку навіть за умов нестабільної мережі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Azari, A., Chalise, B. K. (2022). *Propagation characteristics of millimeter-wave signals in urban environments*. IEEE Transactions on Wireless Communications, 21(5), 3547–3556. https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3147856

2. Chen, W., Li, Z., Zhang, X. (2023). *Wideband channel modeling for 5G and beyond: A propagation perspective.* IEEE Access, 11, 5017–5031. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3249562

3. Kim, Y., Choi, J. (2022). *Path loss models for wideband communication systems: A comparative analysis*. IEEE Communications Magazine, 60(10), 44–50. https://doi.org/10.1109/MCOM.2022.9876513

4. Li, H., Wang, J., Sun, Z. (2023). *Characterization of radio wave propagation in smart city environments*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 72(3), 2778–2788. https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3258714

5. Müller, R., Fischer, W. (2023). *Impact of multipath propagation on wideband communication systems*. International Journal of Wireless Information Networks, 30(2), 143–158. https://doi.org/10.1007/s10776-023-00654-9

6. Nguyen, T., Tran, D. (2022). *Fading channel models for wideband systems in urban areas.* Wireless Personal Communications, 123(4), 987–1001. https://doi.org/10.1007/s11277-022-09953-7

7. Oestreich, M., Schmidt, H. (2022). *Propagation models for 5G wideband systems in rural environments*. Journal of Telecommunications, 29(1), 75–84. https://doi.org/10.1016/j.jtelecom.2022.06.004

8. Park, S., Hong, Y. (2023). *Frequency-dependent propagation characteristics in wideband networks*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 71(7), 4553–4565. https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3264719

9. Qian, L., Zhou, M. (2024). *Radio wave diffraction and its impact on wideband system performance*. Progress In Electromagnetics Research, 174, 89–102. https://doi.org/10.2528/PIER23012104

10. Rahman, M. S., Islam, M. T. (2023). *Modeling of radio wave absorption in dense urban scenarios*. IEEE Transactions on Broadcasting, 69(2), 115–124. https://doi.org/10.1109/TBC.2023.3271846

11. Smith, D., Brown, T. (2022). *Propagation characteristics in wideband mobile communication systems*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 40(11), 3456–3468. https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3197431

12. Tan, J., Lee, C. (2024). *Scattering effects in wideband systems for vehicular networks*. IEEE Internet of Things Journal, 11(1), 97–109. https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3295683

13. Wang, Y., Zhang, R. (2022). *Analysis of wideband radio wave propagation in indoor environments*. IEEE Transactions on Communications, 70(12), 8992–9004. https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3248981

14. Xie, Q., Yu, T. (2023). *The role of reflection and refraction in wideband systems: A practical study*. Journal of Communications, 18(2), 56–68. https://doi.org/10.1109/JCOMM.2023.3245678

15. Zhao, K., Liu, F. (2023). *Modeling and simulation of wideband radio propagation in mountainous areas*. IEEE Access, 11, 7025–7040. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3256754

16. Azari, A., & Chalise, B. K. (2022). *Propagation characteristics of millimeter-wave signals in urban environments*. IEEE Transactions on Wireless Communications, 21(5), 3547–3556. https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3147856

17. Chen, W., Li, Z., & Zhang, X. (2023). *Wideband channel modeling for 5G and beyond: A propagation perspective*. IEEE Access, 11, 5017–5031. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3249562

18. Kim, Y., & Choi, J. (2022). *Path loss models for wideband communication systems: A comparative analysis*. IEEE Communications Magazine, 60(10), 44–50. https://doi.org/10.1109/MCOM.2022.9876513

19. Li, H., Wang, J., & Sun, Z. (2023). *Characterization of radio wave propagation in smart city environments*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 72(3), 2778–2788. https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3258714

20. Müller, R., & Fischer, W. (2023). *Impact of multipath propagation on wideband communication systems*. International Journal of Wireless Information Networks, 30(2), 143–158. https://doi.org/10.1007/s10776-023-00654-9

21. Nguyen, T., & Tran, D. (2022). *Fading channel models for wideband systems in urban areas*. Wireless Personal Communications, 123(4), 987–1001. https://doi.org/10.1007/s11277-022-09953-7

22. Oestreich, M., & Schmidt, H. (2022). *Propagation models for 5G wideband systems in rural environments*. Journal of Telecommunications, 29(1), 75–84. https://doi.org/10.1016/j.jtelecom.2022.06.004

23. Park, S., & Hong, Y. (2023). *Frequency-dependent propagation characteristics in wideband networks*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 71(7), 4553–4565. https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3264719

24. Qian, L., & Zhou, M. (2024). *Radio wave diffraction and its impact on wideband system performance*. Progress In Electromagnetics Research, 174, 89–102. https://doi.org/10.2528/PIER23012104

25. Rahman, M. S., & Islam, M. T. (2023). *Modeling of radio wave absorption in dense urban scenarios*. IEEE Transactions on Broadcasting, 69(2), 115–124. https://doi.org/10.1109/TBC.2023.3271846

26. Smith, D., & Brown, T. (2022). *Propagation characteristics in wideband mobile communication systems*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 40(11), 3456–3468. https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3197431

27. Tan, J., & Lee, C. (2024). *Scattering effects in wideband systems for vehicular networks*. IEEE Internet of Things Journal, 11(1), 97–109. https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3295683

28. Wang, Y., & Zhang, R. (2022). *Analysis of wideband radio wave propagation in indoor environments*. IEEE Transactions on Communications, 70(12), 8992–9004. https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3248981

29. Xie, Q., & Yu, T. (2023). *The role of reflection and refraction in wideband systems: A practical study*. Journal of Communications, 18(2), 56–68. https://doi.org/10.1109/JCOMM.2023.3245678

30. Zhao, K., & Liu, F. (2023). *Modeling and simulation of wideband radio propagation in mountainous areas*. IEEE Access, 11, 7025–7040. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3256754

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Презентація по магістерській роботі
на тему:

Метод підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль

Виконав: Віталій МИХАЙЛЕНКО

Керівник: Наталія РУДЕНКО, к.т.н., доцент

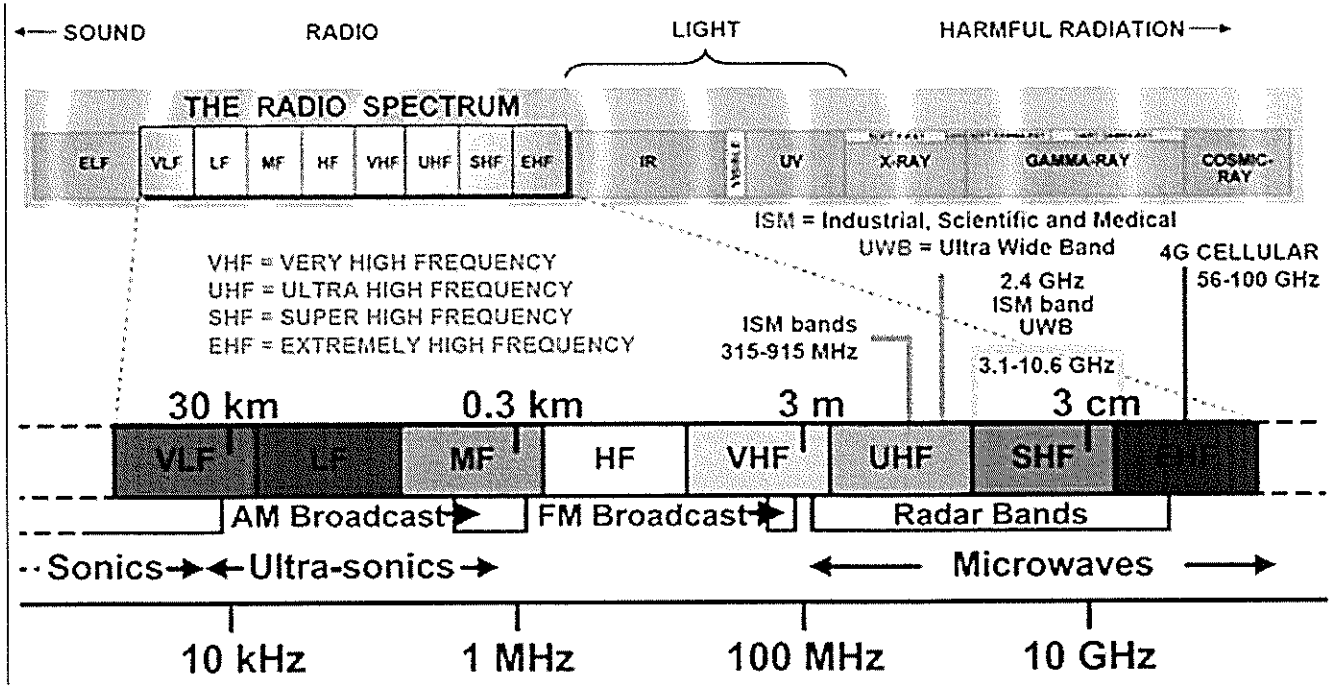
Мета роботи

Мета роботи – дослідження методів підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

Об'єкт дослідження – процес передачі даних у безпроводових широкосмугових системах.

Предмет дослідження – методи підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

Роль радіохвиль в галузі телекомунікацій

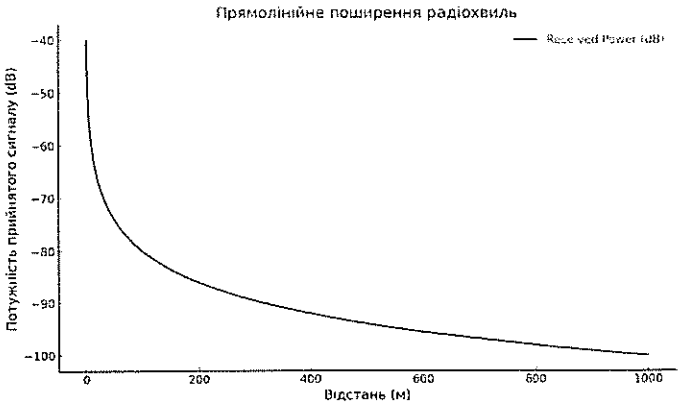


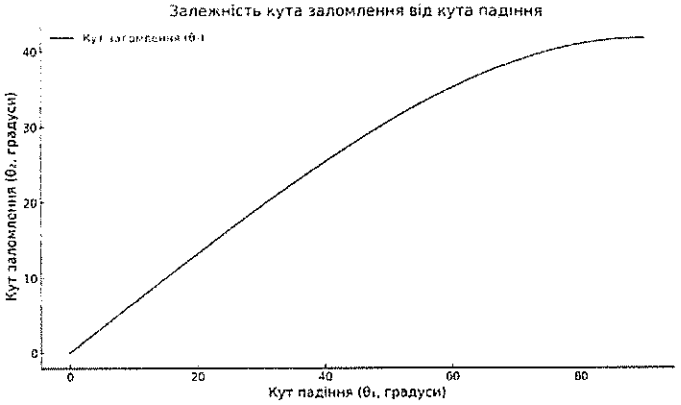
Теорія розповсюдження радіохвиль — це розділ електродинаміки, що вивчає процеси передачі, відбиття, заломлення, дифракції та поглинання радіохвиль у різних середовищах. Вона описує фізичні закономірності взаємодії електромагнітних хвиль з природними та штучними перешкодами, а також враховує вплив географічних, атмосферних і космічних факторів на поширення сигналу. Ця теорія використовується для проєктування телекомунікаційних систем, визначення зон покриття, оптимізації антенно-фідерних систем і підвищення якості зв'язку в різних умовах.

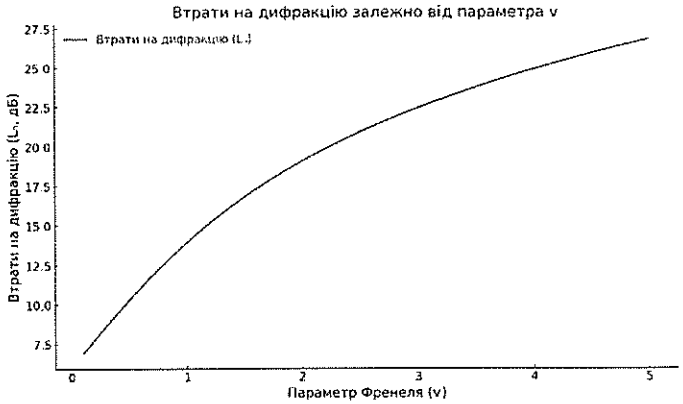
Основні аспекти теорії розповсюдження радіохвиль

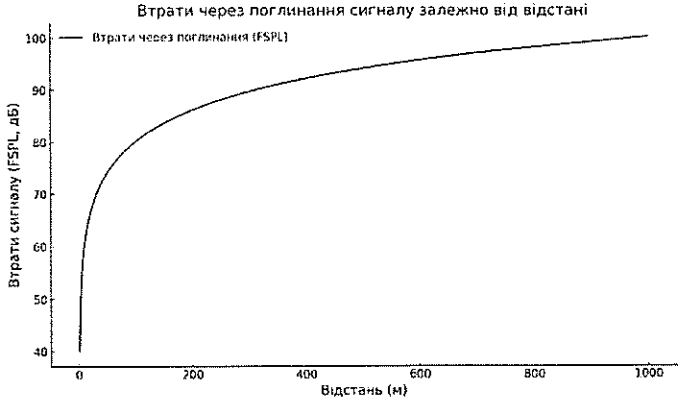
Показник	Опис	Формула
Прямолінійне поширення радіохвиль	Властивість високочастотних хвиль поширюватись по прямій лінії, найбільш придатні для лінійної видимості (LOS).	$P_r = P_t * (\lambda / (4\pi d))^2$
Відбиття та заломлення	При зустрічі з перешкодами радіохвилі можуть відбиватися або заломлюватися. Важливо для побудови мереж у міських умовах.	$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2)$
Дифракція	Радіохвилі можуть огинати перешкоди. Важливо для забезпечення покриття сигналом за фізичних об'єктів між передавачем і приймачем.	$L_d = 6.9 + 20 * \log(\sqrt{((v - 0.1)^2 + 1)} + v - 0.1)$
Поглинання	Радіохвилі втрачають енергію при проходженні через матеріали. Особливо помітно на високих частотах.	$FSPL(dB) = 20 * \log(d) + 20 * \log(f) - 147.55$
Розсіювання	Спричинене малими перешкодами, які менші за довжину хвилі, що створює додаткові шляхи до приймача.	$Intensity \propto 1 / \lambda^4$

Показники теорії розповсюдження радіохвиль

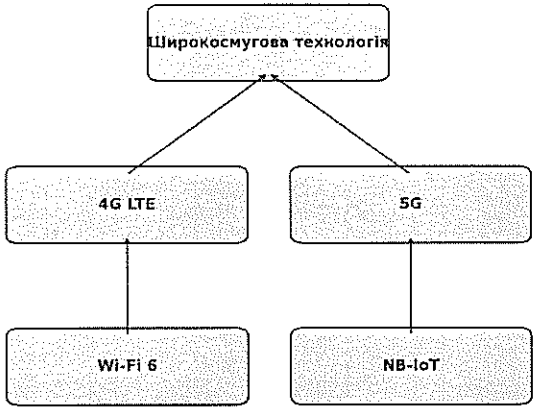








Особливості широкосмугових безпроводових систем зв'язку



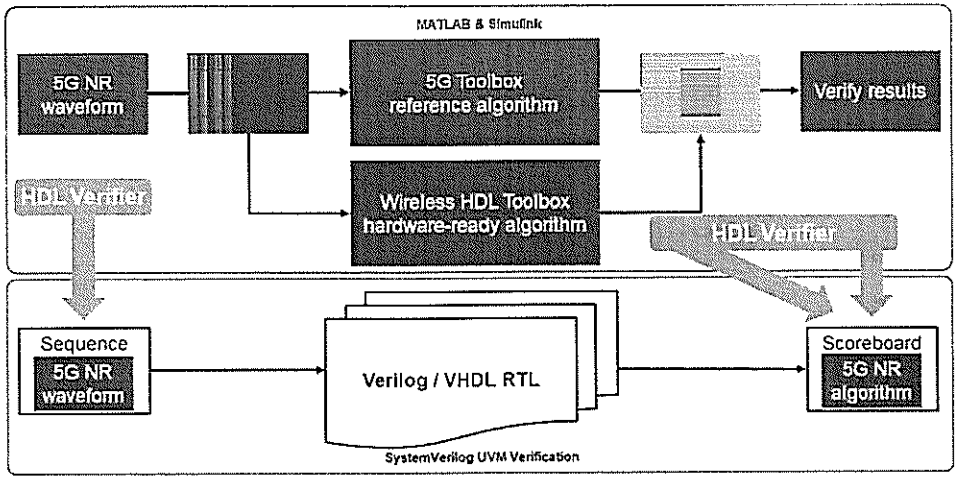
Технологія	Частотний діапазон	Швидкість передачі даних	Ширина смуги частот каналу зв'язку
4G LTE	700 МГц – 2.6 ГГц	До 1 Гбіт/с	20 МГц
5G	24 ГГц – 300 ГГц	До 10 Гбіт/с	100 МГц – 800 МГц
Wi-Fi 6	2.4 ГГц та 5 ГГц	До 9.6 Гбіт/с	160 МГц

Методи підвищення ефективності роботи широкосмугових систем на основі відеокодеків H.264/H.265

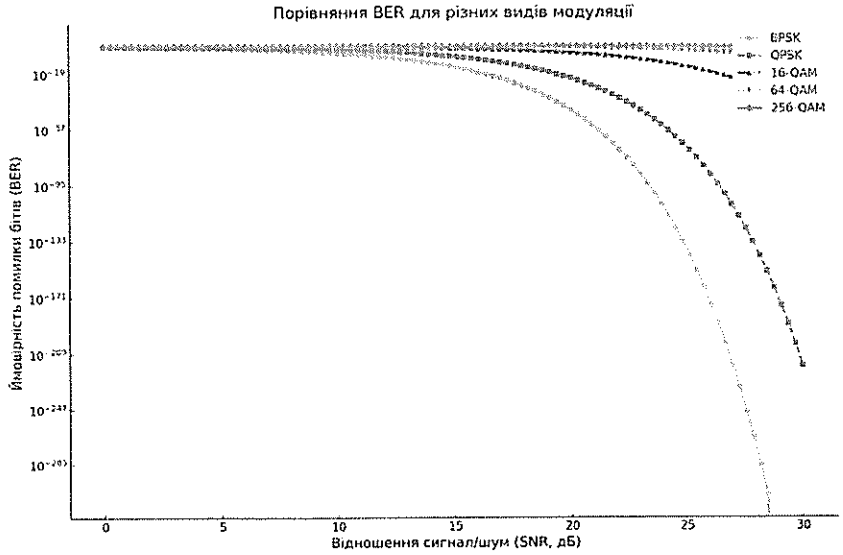


Характеристика	H.264 (AVC)	H.265 (HEVC)
Ефективність стиснення	Зниження бітрейту на 50% порівняно з MPEG-2. Використовує блоки розміром 16x16 (макроблоки).	Зниження бітрейту на 30-50% порівняно з H.264. Використовує coding units розміром до 64x64.
Підтримка роздільності	До 4K (хоча оптимізовано для 1080p). Максимальний розмір кадру: 4096x2304.	До 8K (8192x4320). Підтримує адаптивне підвищення роздільності для майбутніх форматів.
Стійкість до помилок	Менш ефективна для слабких мереж, підтримка FEC (Forward Error Correction) обмежена.	Покращене виправлення помилок, зменшена ймовірність втрат кадрів у нестабільних мережах.
Обчислювальні вимоги	Низькі вимоги до процесора, оптимізований для пристроїв з обмеженими ресурсами.	Високі вимоги до апаратного забезпечення через складні алгоритми стиснення.
Розмір блоку	Фіксований розмір макроблоку 16x16, що обмежує ефективність при роботі з високою роздільністю.	Використовує ієрархічну структуру блоків (CTU) розміром до 64x64 для більшого стискання.
Профілі та рівні	Baseline, Main, High (до рівня 5.1). Підтримує обмежений набір параметрів для старих систем.	Main, Main10, Main Still Picture. Адаптивні профілі для високоякісного відео.
Затримка	Мінімальна затримка, придатний для відеоконференцій.	Збільшена затримка через складність обробки, але оптимізована для 4K/8K-потоків.
Застосування	Широке використання у потоковому відео, відеоконференціях, телебаченні (Full HD).	Оптимізований для 4K/8K-відео, VR, AR, де висока пропускна здатність є критичною.

Дослідження завадостійкості систем широкосмугових безпроводових систем за допомогою ПЗ Matlab Simulink



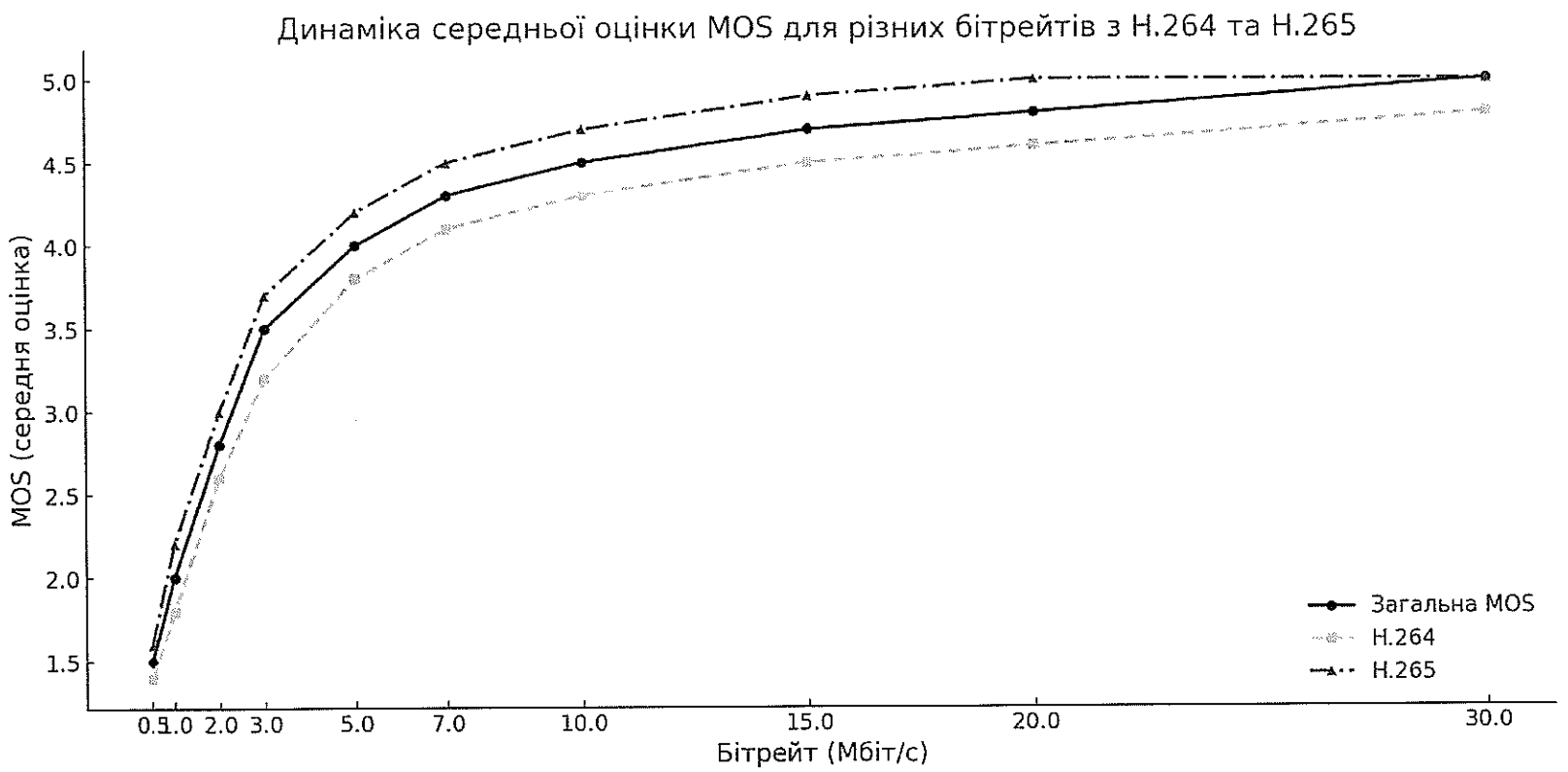
Імітаційна модель сигналу 5G для перевірки SystemVerilog за допомогою 5G Toolbox



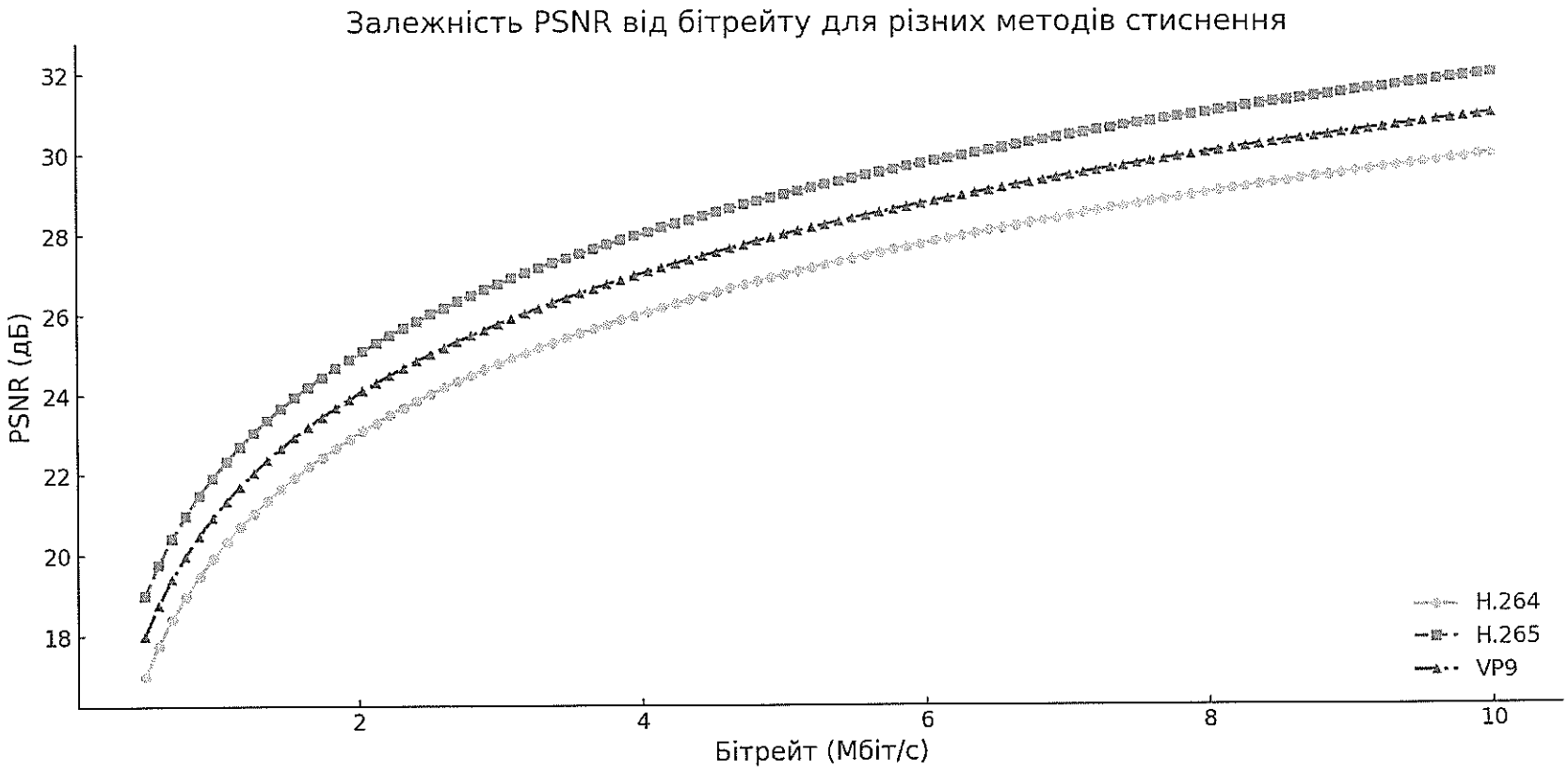
Методи оцінки якості потокового відео

Метод оцінки якості	Тип методу	Особливості
MOS (Mean Opinion Score)	Суб'єктивний	Оцінка якості відео групою експертів за шкалою від 1 до 5.
DSIS (Double Stimulus Impairment Scale)		Порівняння референсного та спотвореного відео для оцінки впливу спотворень.
SAMVIQ		Оцінка кількох відеопослідовностей одночасно в реальному часі.
MSE (Mean Square Error)	Об'єктивний	Вимірює середньоквадратичну помилку між оригінальним і декодованим відео.
PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)		Популярна метрика, що обчислюється на основі MSE і виражається в децибелах.
SSIM (Structural Similarity Index)		Порівнює структурні характеристики зображення, враховуючи яскравість, контраст та структуру.
VMAF	Гібридний	Поєднує об'єктивні метрики для точнішої оцінки якості відео на основі людського сприйняття.
SVM (Support Vector Machine)		Використання алгоритмів машинного навчання для автоматизації процесу оцінки якості на основі об'єктивних та суб'єктивних даних.
Гібридний підхід на основі PSNR і SSIM		Застосування комбінації традиційних метрик для розрахунку показників якості, що дозволяє враховувати як спотворення, так і структурну схожість.
QoE (Quality of Experience)	Мережевий	Враховує користувацький досвід і сприйняття якості відео в умовах ненадійного середовища.
P.1203 (ITU-T Standard)		Метод ITU для оцінки якості потокового відео з урахуванням мережевих умов.
DASH		Адаптивне налаштування бітрейту на основі умов мережі для покращення якості передачі відео.

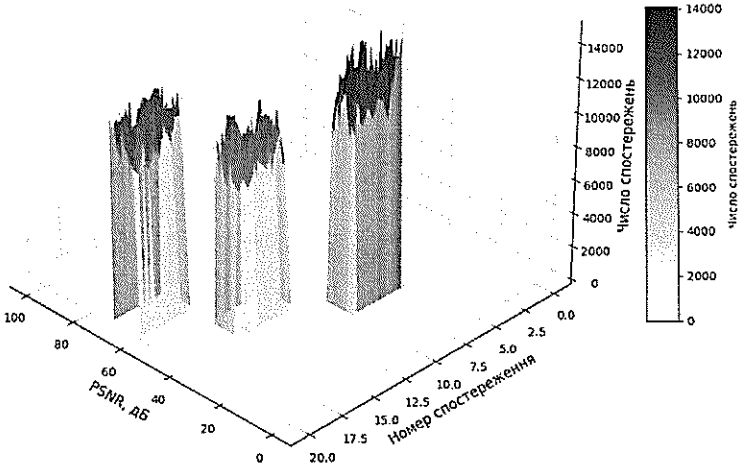
Динаміка середньої оцінки MOS для різних бітрейтів з H.264 та H.265



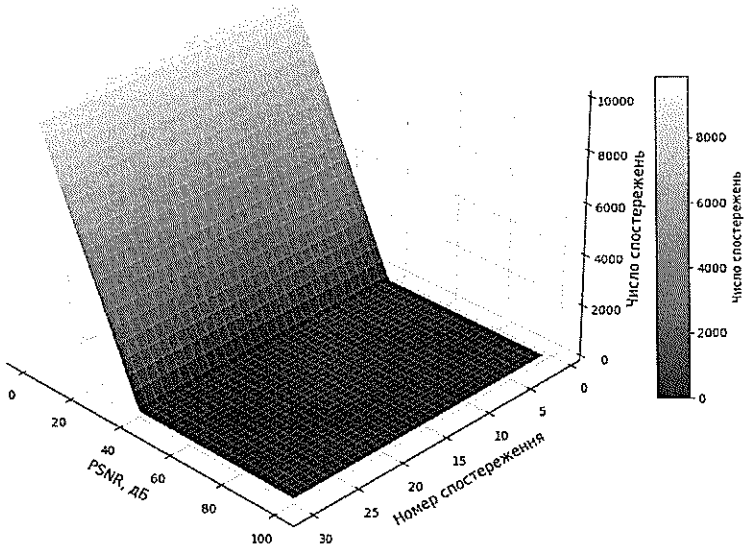
Залежність PSNR від бітрейту для різних методів стиснення



Вплив помилок на візуальну якість відео



Вплив бітових помилок на візуальну якість відео



Вплив пакетних помилок на візуальну якість відео

Висновки

В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

У першому розділі досліджено теоретичні основи розповсюдження радіохвиль у широкосмугових системах. Проаналізовано властивості радіохвиль (відбиття, заломлення, дифракція, поглинання), їхній вплив на ефективність телекомунікаційних мереж та особливості частотних діапазонів у різних галузях. Підкреслено важливість оптимізації архітектури мереж для забезпечення якісного зв'язку в умовах перешкод.

У другому розділі запропоновано методи підвищення ефективності роботи широкосмугових систем на основі відеокодеків H.264/H.265. Вивчено можливості зменшення бітрейту без втрати якості, оптимізації використання мережевих ресурсів і зниження енергоспоживання. Встановлено, що ці методи сприяють покращенню якості відеозв'язку навіть в умовах обмеженої пропускної здатності.

У третьому розділі систематизовано методи оцінки якості відеопотоків, включаючи суб'єктивні, об'єктивні (PSNR, SSIM) і гібридні підходи (VMAF, SVM). Досліджено вплив бітових і пакетних помилок на якість відео, показано, що BER понад 10^{-3} і PER понад 5% значно знижують якість. Запропоновано використання FEC-кодів та адаптивного управління потоками для мінімізації цих впливів і забезпечення стабільного відеозв'язку в умовах нестабільних мереж.

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Віталій МИХАЙЛЕНКО

Назва: Метод підвищення ефективності роботи перспективних широкосмугових систем на основі теорії розповсюдження радіохвиль

Координатор: Наталія РУДЕНКО

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:1.1

Коефіцієнт подібності 2:0.3

Тривога: 0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*