

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ВПЛИВУ ЗАВАД
БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи РТДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Козлов Б.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Макаренко А.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
1 СТАН ПРОБЛЕМИ ПЕРЕДАЧІ ПОТОКОВИХ СЕРВІСІВ В СИСТЕМАХ ШБД.....	12
1.1 Характеристика потокового відео	12
1.2 Трансляція потокового відео по мережах ШБД	17
1.3 Моделі помилок в мережах широкосмугового безпроводового доступу..	22
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПОТОКОВОГО ВІДЕО В СИСТЕМАХ ШБД	26
2.1 Оцінка якості потокового відео	26
2.2 Дослідження програмно-апаратного комплексу для оцінки якості потокового відео.....	31
2.3 Дослідження систем ШБД для передачі потокового відео за допомогою ПЗ NS-2	34
2.4 Дослідження завадостійкості систем ШБД за допомогою ПЗ Matlab Simulink.....	36
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ НА ЯКІСТЬ ПОТОКОВОГО ВІДЕОСТАНДАРТУ H.264/AVC ПРИ ПЕРЕДАЧІ В СИСТЕМАХ ШБД	45
3.1 Експериментальні дослідження якості відеостандарту H.264/AVC при передачі по мережі ШБД за допомогою ПАК	45
3.2 Вплив бітових помилок на візуальну якість потокового відео	47
3.3 Вплив пакетних помилок на візуальну якість потокового відео	51
3.4 Вплив довжини групи помилок на якість потокового відео	53
ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	58

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AMC (Adaptive Modulation and Coding) - технологія адаптивної модуляції і кодування;

AWGN (Additive White Gaussian Noise) - аддитивний білий шум Гауса;

BER (Bit Error Rate) - вірогідність появи бітових помилок;

FTP (File Transfer Protocol) - протокол передачі файлів;

GE (Gilbert - Elliott) - модель Гільберта-Еліота;

GOP (Group of Pictures) - група кадрів;

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - Інститут інженерів по електротехніці і електроніці;

IP TV (Internet Protocol Television) - цифрове інтерактивне телебачення в мережах передачі даних по протоколу IP;

ISO (International Standardization Organization) - Міжнародна організація по стандартизації;

ITU (International Telecommunication Union) - Міжнародний союз електров'язку;

JPEG (Joint Photographic Experts Group) - формат зображень;

MIMO (Multiple Input Multiple Output) - технологія передачі даних з допомогою безлічі антен;

MOS (Mean Opinion Score) - усереднена оцінка;

MPEG (Motion Pictures Experts Group) - алгоритм стискування зображень і звуку;

MPEG - TS (MPEG Transport Stream) - транспортний потік MPEG;

MSE (Mean Square Error) - середньоквадратична помилка;

MSUCQE (MSU Continuous Quality Evaluation) - безперервна оцінка якості;

NTSC (National Television Standards Committee) - стандарт телевізійного мовлення;

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) - ортогональне частотне мультиплексування;

PAL (Phase - Alternating Line) - стандарт телевізійного мовлення;

PAM (Pulse - Amplitude Modulation) - амплітудно-імпульсна модуляція;

- PER (Packet Error Rate) - вірогідність появи пакетних помилок;
- PSNR (Peak Signal - To - Noise Ratio) - пікове відношення сигналу до шуму;
- QAM (Quadrature Amplitude Modulation) - квадратурна амплітудна модуляція;
- QCIF (Quarter CIF) - розмір зображення рівний 176x144 пікселів;
- QoS (Quality of Service) - якість послуг, що надаються;
- RBSP (Raw Byte Sequence Payload) - сира бітова послідовність;
- RGB (Red Green Blue) - колірна схема червоно-зелений-синій;
- RMSE (Root - Mean - Square Error) - середньоквадратична помилка;
- RTP (Real - Time Transport Protocol) - протокол передачі в режимі реального часу;
- RTSP (Real - Time Streaming Protocol) - протокол потокової передачі в режимі реального часу;
- SAD (Sum of Absolute Difference) - сума абсолютних відмінностей;
- SAMVIQ (Subjective Assessment Method for Video Quality evaluation) - суб'єктивний метод оцінки якості відео;
- SCACJ (Stimulus Comparison Adjectival Categorical Judgement) - оцінка відео з використанням порівняльної шкали;
- SISO (Single - Input Single - Output) - технологія передачі даних за допомогою однієї антени;
- SNR (Signal - to - Noise Ratio) - відношення сигнал/шум;
- VLC (Variable - Length Coding) - код змінної довжини;
- YUV - колірна схема яскравість-контрастність-насиченість;
- АС - абонентська станція;
- БС - базова станція;
- ВДСГ - високодинамічна сюжетна група;
- ДФР - додаткові функції розподілу;
- МБ - макроблок;
- МРСГ - малорухома сюжетна група;
- ССГ - статична сюжетна група;
- ТВЧ - телебачення високої чіткості;
- ШБД - широкосмуговий безпроводовий доступ.

ВСТУП

Починаючи з впровадження перших комерційних продуктів в Інтернеті, спостерігається бурхливий ріст послуг з передачі мультимедійних даних. Основну долю ресурсів при передачі займають потокові дані. Перевага потокової передачі даних полягає в тому, що аудіо і відео матеріали наочно представляють інформацію в легко сприйманому вигляді. Це, у свою чергу, ефективно в рекламі, торгівлі, навчанні і інструктажі [1]. Для компаній це означає збільшення ефективності, велику рентабельність і менші витрати на доставку інформації. Традиційний спосіб доставки файлів з мережі за допомогою завантаження недостатньо зручний для аудіо- і відеоданих навіть з урахуванням того, що клієнтські з'єднання стають швидше. Часто швидкості передачі недостатні для завантаження відеофайлів, розмір яких складає десятки мегабайт. Вирішення проблеми великих файлів існує вже декілька років - технологія передачі поточкових даних. За допомогою поточкового мультимедіа-плеєра, наприклад QuickTime компанії Apple, Media Player компанії Microsoft або RealPlayer компанії RealNetworks, можливо відтворити відео- або аудіодані через декілька секунд після надходження перших бітів потоку на комп'ютер.

На сьогодні щомісячне збільшення об'ємів цієї послуги обчислюється мільйонами годин відтворення і сотнями тисяч нових медіа-серверів. Крім того, це послугою регулярно користуються більше 250 мільйонів зареєстрованих абонентів, яке поповнюється щодня більш ніж на 200 000 користувачів.

Це стрімке збільшення визначило нове складне завдання по підтримці якості обслуговування. На сьогодні терміном «потокове відео» (streaming video) визначають технології стискування і буферизації даних для передачі відео в реальному часі через мережі зв'язку [2]. Останніми роками спостерігається розвиток і бурхливий ріст технологій, що використовують як транспорт безпроводові технології широкосмугового доступу, які є серйозною альтернативою стільниковим системам зв'язку. Це стрімке збільшення визначило нове складне завдання по підтримці якості обслуговування при трансляції відео.

Основним недоліком передачі відео по безпроводових мережах є відсут-

ність достатньої синхронізації між оригінальною послідовністю і декодованою на приймальній стороні копією. Через агресивне середовища передачі пакети даних можуть зазнавати серйозні спотворення або, взагалі, втрачатися. На сьогодні не існує стандартних підходів до визначення впливу комплексу помилок на якість передачі сервісів, що надаються.

Вказані проблеми, в поєднанні з комерційним успіхом, примушують проводити дослідження, спрямовані на ефективне, стабільне і масштабоване кодування і передачу відео по нестабільних мережах до яких відносяться зокрема безпроводові технології широкосмугового доступу.

Таким чином, магістерська робота, присвячена дослідженню впливу завад в каналах широкосмугового безпроводового доступу на візуальну якість потокового відео, є актуальною.

Мета роботи – розробка імітаційної моделі впливу завад безпроводових мереж.

Об’єкт дослідження – цифрова мережа зв’язку.

Предмет дослідження – якість послуг, які надаються широкосмуговими системами безпроводового доступу при передачі потокового відео.

Метод дослідження – методи системного аналізу, елементи методів теорії ієрархічних багаторівневих систем, методи оптимального управління, методи експериментальних досліджень.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати магістерської атестаційної роботи доповідалися на ІХ Науково-технічній конференції «Сучасні інфокомунікаційні технології», Київ: ДУТ, 5 грудня 2019 р.

Публікації. Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі “Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку, – 2019, – №3”.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ПЕРЕДАЧІ ПОТОКОВИХ СЕРВІСІВ В СИСТЕМАХ ШБД

1.1 Характеристика потокового відео

Потоковий трафік - тип трафіку, для якого характерний перегляд і прослуховування інформації у міру її надходження в кінцеве для користувача обладнання. Основну частину потокового трафіку складає потокове відео- і аудіо мовлення [1] (рис. 1.1).

Відеопотік - термін, використовуваний при передачі відео в режимі реального часу. Основною особливістю потокового відео є те, що при його передачі користувач не повинен чекати повного завантаження файлу для перегляду. Відео транслюється безперервним потоком у вигляді послідовності стислих пакетів в спеціальному форматі, і не вимагає повного завантаження файлу, що містить відеодані. Перегляд починається у момент достатньої буферизації даних, забезпечуючи при цьому рівномірне відображення даних. В деякій мірі відеопотік аналогічний традиційному телемовленню з безперервним отриманням і відображенням відеокадрів. Для порівняння, при перегляді відео в стандарті DVD потрібне повне завантаження відеофайлу.

Існують два способи передання потокового відео - послідовний (progressive streaming) і в реальному часі. При передачі послідовним способом якість зображення завжди краща, оскільки відео відтворюється з носія інформації, на який заздалегідь здійснюється запис. Недоліком послідовного способу передання є неможливість перегляду по епізодах і можливість переповнювання носія інформації на приймальній стороні. Тому послідовна передача відео використовується тільки для коротких кліпів.

Для передачі відео в реальному часі потрібно спеціальний потоковий сервер (streaming server). Відеофайл зберігається на цьому сервері, і не зберігається на боці клієнта. Передачу відео в реальному часі зручно використовувати для трансляції файлів великої довжини.

Система трансляції потокового відео має чотири основні підсистеми (рис. 1.1):

1. Пристрій кодування, який стискує відеопотік і завантажує його потім на медіа-сервер. Для досягнення найбільшої ефективності, початкове відео має бути стиснуте перед передачею. Механізми стискування відео можна розділити на дві категорії: масштабоване і немасштабоване кодування. При зміні пропускної спроможності мережі доцільне використання масштабованого кодування;
2. Медіа-сервер, який зберігає стиснений мультимедіапотік і передає його користувачеві за запитом. Цей сервер грає ключову роль в передачі потокового відео. Медіа-сервери зобов'язані уміти обробляти мультимедійні дані в обмежений час і підтримувати інтерактивний контроль (пауза, перемотування). Завданням медіа-сервера є взаємодія з транспортною мережею при відправці пакетів в потрібний час. Оскільки основне завдання по ефективній і стійкій передачі виконує пристрій кодування, який не може робити адаптацію до умов каналу, що змінюються, це завдання виконує медіа-сервер. Зазвичай він складається з трьох компонентів механізму трансляції (наприклад транспортні протоколи), операційної системи і системи зберігання;
3. Транспортна мережа, яка транслює пакети від медіа-сервера до клієнтського пристрою за допомогою спеціально розроблених і стандартизованих протоколів. Протоколи забезпечують такі послуги зв'язку, як мережева адресація, транспортування і контроль за сеансом зв'язку. Згідно з їх функціональними можливостями, протоколи класифікуються на три категорії, протокол мережевого рівня, транспортний протокол, і протокол контролю за сеансом зв'язку;
4. Клієнтський додаток, який декодує і відтворює мультимедіапотік і має засоби контролю і управління. Крім того можлива наявність механізму синхронізації аудіо і відео, що відрізняє потокові мультимедійні додатки від інших традиційних додатків. Клієнт потокового відео зазвичай використовує методи виявлення і приховання помилок, щоб зменшити вплив втрачених пакетів на загальну якість. Для стабільної роботи ці компоненти мають бути спроектовані і оптимально погоджені.

Ріст потокового трафіку зростає, незважаючи на наявність дестабілізуючих чинників при передачі відеопотоку по мережі, таких, як зміну пропускну здатності (наявність вузьких каналів), затримки і втрати пакетів. Ці чинники можуть серйозно впливати на якість потокового відео, оскільки стислі дані дуже чутливі до цих помилок. Потокове мовлення вимагає стабільного з'єднання. Оскільки деякі мережі зв'язку не можуть забезпечити пряму передачу даних між відправником і одержувачем, потік може обриватися або призупинятися на якийсь час.

Оскільки вміст відеопотоку надзвичайно чутливий до доступної пропускну здатності і QoS, якість відтворення, з точки зору глядача, тісно пов'язана з такими характеристиками мережі, як продуктивність, варіація затримки і кількість втрачених пакетів.

З появою мобільних клієнтських пристроїв, що мають на увазі передачу по безпроводових мережах, успішна передача потокового відео має на увазі:

- 1) безперервне надання послуг навіть при русі [3];
- 2) адаптація характеристик передаваного відео згідно з особливостями (характеристикам) мережі зв'язку.

Успішне просування потокового відео стало можливим, зокрема, завдяки стандарту MPEG - 2, розробленому більше 15 років тому і широко використовуваному нині, але морально застарілому. На даний момент використовуються досконаліші стандарти відеокодування, такі як, наприклад H.264/AVC. На підставі аналізу ринку апаратних розробок в області відеокодування і напрямів наукових досліджень можна зробити висновок, що стандарт H.264/AVC займе лідируюче положення серед форматів стискування відео найближчим часом.

В ході створення і формалізації нового процесу стискування відео людство йшло до підсумкового формату силами відразу декількох організацій (ITU, ISO і т. д.) і тому новий стандарт має п'ять імен: H.264, MPEG - 4 Part 10, AVC, H.26L, JVT. Використання нового стандарту кодування можливе в самих різних системах передачі цифрового відео, відомих під декількома назвами: Інтернет-ТБ, IP-TV, потокове відео (streaming video), відео через IP (Video over IP), відеоінформації IP-системи, включаючи трансляцію з різним дозволом, аж до телебачення високої

чіткості 1080i (ТВЧ). Новітній стандарт H.264, так само як і більше ранні версії MPEG - 4, дозволяє досягти високих рівнів стискування за рахунок використання просторової і часової надмірності у відеокадрах. Таким чином, обробці підлягають тільки ті елементи зображення, які змінилися в порівнянні з аналогічними елементами попереднього кадру.

Для зручності використання в різних додатках і різноманітних мережах кодек H.264 розділений на рівні кодування відео VCL (від англ. Video Coding Layer) і мережевій абстракції NAL (рис. 1.2).

Розбиття на рівні дозволяє не залежати від умов передачі мережі. Рівень VCL складається з основного механізму стискування, і включає синтаксичні рівні, відомі як слайс, макроблок (МБ) і блок. Рівень NAL H.264/AVC визначає інтерфейс між відеокодеком безпосередньо і зовнішнім середовищем і призначений для адаптації бітової послідовності, генеровані VCL для подальшої передачі по різних мережах.

У типових зображеннях у форматі RGB є істотна кореляція між кольоровими компонентами і з точки зору стискування цей формат є свідомо надмірним. У стандартах телевізійного мовлення використовується інше представлення зображень, при якому також використовуються три компоненти сигналу, але при цьому ці компоненти не корельовані один з одним. Компоненти R, G, B перетворюються в яскравісну компоненту Y і дві кольорорізницеві компоненти U і V, формату YUV. Оскільки велика інформативність зберігається в яскравісній компоненті, то буде втрачено мало інформації, якщо виконати проріджування компонент U і V. Таким чином, виходить стискування без помітного спотворення зображення. Далі початкове зображення розбивається на блоки В H.264/AVC в процесі кодування використовуються блоки змінного розміру, на відміну від MPEG - 2, де зображення ділиться на макроблоки 16x16 для яскравісного компонента (Y) і на макро блоки 8x8 для кольорорізницевих компонентів (Cr і Cb). Так для «внутрішніх» 1-кадров стандартним є розмір блоку 4x4 Такі маленькі блоки дозволяють уникнути артефактів, приміром, при трансляції зображення з дрібними деталями або при передачі ТВЧ. На тих же ділянках картинки, де така тонка робота від кодера не потрі-

бно, використовуються стандартні блоки 16x16. У проміжних кадрах P і B кодек H.264 може також використовувати різні блоки (рис. 1.3).

Слайсы в H.264/AVC є послідовності макроблоків, які обробляються в порядку сканування растру, якщо не використовується гнучке впорядкування макроблоків FMO (від англ. Flexible Macroblock Ordering). FMO змінює спосіб ділення зображення на слайсы. Число макроблоків в кожному слайсе може бути фіксованим, або може визначатися числом байтів [4].

Інкапсуляція в різні транспортні протоколи і формати медіафайлів відбувається за допомогою модулів NALU (від англ. NAL Unit), основною одиницею бітового потоку, що являється. Кожен NALU містить заголовок і сиру бітову послідовність закодованих даних слайса RBSP (від англ. Raw Byte Sequence Payload). Структура NALU представлена на рис. 1.4.

Перший байт NALU є заголовком і включає: нульовий перший біт, другий і третій біти для позначення необхідності відновлення NRI (від англ. NAL Reference Identification). П'ять бітів, що залишилися, визначають один з 32 можливих варіантів типу NALU.

NAL працює в двох режимах: без розподілу, або з розподілом даних слайса на різні пакети. Ця особливість стандарту H.264/AVC відома як розподіл даних DP (від англ. Data Partitioning). Принцип полягає в розподілі слайса на три різні модулі NAL, кожен з яких містить певну частину слайса. Частина A містить найбільш важливі дані, а саме, заголовки макроблоків, вектори руху і параметри квантування. Части B і C включають коефіцієнти перетворення intra - і inter - закодованих блоків, відповідно (рис. 1.5).

Параметрами відеопослідовності SPS (від англ. Sequence Parameter Set) є, тип профілю, дозвіл і число початкових кадрів. Параметрами зображення PPS (від англ. Picture Parameter Set) є тип кодування ентропії, число груп слайсов FMO, параметр квантування, параметри для деблокінг-фільтра параметрами слайса, що змінюються, є: тип слайса і адреса першого макроблоку в слайсі. Далі NALU може бути інкапсульований в різні транспортні протоколи і формати файлів, такі як MPEG - 2, MPEG - 4 part 2 і 3gp

1.2 Трансляція потокового відео по мережах ШБД

З появою нових компаній-операторів послуг широкосмугового доступу до мереж передачі даних загального користування проникнення цих послуг до споживачів явно не достатнє. Це обумовлено передусім, тим, що проводові засоби, такі як xDSL, і кабельні мережі мають обмежені можливості через дорожнечу і складність доставки послуг до споживача, а виробники обладнання радіодоступу поки не готові до виробництва систем за загальними стандартами. На рис. 1.7 представлена діаграма розвитку стандарту за останні 5 років з вказанням найбільш пріоритетних напрямів розвитку технології на найближче майбутнє. На діаграмі можна бачити, що основною метою WiMAX Forum на найближчі декілька років є розвиток специфікацій мобільного WiMAX і, зокрема, розробка специфікації стандарту 802.16m - найбільш перспективного з серії стандартів 802.16. WiMAX, як і інші технології зв'язку, є природним продовженням розвитку технологій безпроводового зв'язку [4].

Діаграма, приведена на рис. 1.8 ілюструє еволюцію безпроводових мереж передачі даних на шляху до 4G-мережам, що є на сьогодні найбільш перспективними розробками.

Безумовно, що з появою WiFi (IEEE 802.11) технології стали з'являтися безліч точок доступу до магістральних провідних мереж по безпроводовому інтерфейсу. Нині практично будь-який готель, аеропорт або цілий мікрорайон має покриття WiFi доступу на усій своїй території. Обмеження за швидкістю обміну, що в той час були в стандарті, даними, радіусу дії, кількості каналів і вартості розгортання інфраструктури доки не дозволили стати мережам WiFi тотальною загрозою стільниковим мережам з одного боку і провідним мережам з іншою. Незважаючи на значні переваги і введення нових, сучасніших версій стандарту обмеження WiFi будуть замінені тільки новими магістральними стандартами обміну даними типу WiMAX

У секторі стільникових мереж основним конкурентом WiMAX залишаються такі технології, як універсальна система мобільного зв'язку UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) і EV - DO (EVolution - Data Optimized), засновані на кодовому розподілі каналів CDMA.

Завдяки підвищеній компресії, новітній стандарт відео кодування H.264/AVC дозволяє транслювати відео в низькошвидкісних мережах без помітного погіршення якості, що дозволяє використовувати цей стандарт для відеододатків у безпроводових мережах.

Цілком зручним середовищем для передачі потокового відео є IP-мережі, завдяки вимогам до затримки і швидкості передачі даних. Як правило, стандартна IP мережа не залежить від способу реалізації фізичного і каналного рівнів і може працювати з їх різними протоколами. Тому ці рівні не обговорюються.

На мережевому рівні IP-мережі використовують інтернет-протокол IP (від англ. Internet Protocol). Заголовок IP-пакета має розмір 20 байтів і захищений контрольною сумою. Корисна інформація при цьому залишається не захищеною. Максимальний розмір IP-пакета дорівнює 64 кБ, але цей розмір рідко використовується, оскільки максимальний розмір пакету мережі MTU (від англ. Maximum Transfer Unit) обмежений.

На транспортному рівні відеодані зазвичай передаються по транспортному протоколу UDP (від англ. User Datagram Protocol), який, на відміну від протоколу TCP (від англ. Transmission Control Protocol), не гарантує успішну доставку пакетів. Проте, він широко застосовується для передачі потокового відео і у відеотелефонії, внаслідок малої затримки при передачі. Зазвичай, виявлення помилки при передачі по UDP виконується підрахунком контрольної суми [5].

На рівні додатків передача потокового відео забезпечується наступними основними протоколами:

- протокол передачі в режимі реального часу RTP (від англ. Real - Time Transport Protocol) - пакетно-орієнтований транспортний протокол доставки даних в режимі реального часу, включаючи відео і звук ;
- протокол управління в режимі реального часу RTCP (від англ. Real - Time

Control Protocol) - протокол управління, створений для спільної роботи з RTP, він допомагає здійснювати синхронізацію відео і звуку, забезпечувати якість обслуговування (QoS);

- протокол потокової передачі в режимі реального часу RTSP (від англ. Real - Time Streaming Protocol) - протокол управління для ініціалізації і напряду поточкових даних від відеосервера, що реалізовує можливості «віддаленого управління»;

- протокол резервування ресурсів RSVP (від англ. Resource Reservation Protocol) - протокол встановлення і підтримки необхідного рівня якості обслуговування (QoS), що забезпечує наявність відповідних мережевих ресурсів (наприклад, достатньої смуги пропускання).

На рис. 1.9 представлена фізична і протокольна структура трансляції відео по безпроводовій мережі в контексті моделі OSI [1].

Інкапсуляція NALU для різних транспортних мереж таких як H.320 , систем MPEG - TS і RTP/IP знаходиться поза областю стандартизації H.264/AVC. При цьому усі форми пакетування NALU H.264 називають схемою з «простим пакетуванням», при якому один NALU поміщається в один пакет RTP. Правила пакетування для цього способу досить прості - NALU (включаючи його заголовок, який також служить заголовком корисних даних) поміщається в RTP пакет, параметри заголовка визначаються згідно специфікації , і далі пакет RTP вирушає на транспортний рівень UDP. На рис. 1.10 представлена структура стека протоколів при передачі мультимедіапотоків.

Використання ієрархічного кодування дозволяє забезпечити поширення відеоінформації в складних мережах з різною пропускною спроможністю окремих сегментів. В ідеалі, VCL не повинен виробляти NALU, розміром більше розміру MTU, тим самим уникаючи фрагментації на IP рівні. Це легко досягається шляхом використання слайсів. Проте, оскільки NALU менше 64 кБ, IP-рівень виконує фрагментацію і рекомбінацію фрагментованих пакетів.

Застосування досконаліших методів кодування не дозволяє повною мірою уникнути появи характерних спотворень відео при трансляції додатків в реально-

му часі. Як правило, в провідних мережах, в яких смуга пропускання достатня, канал передачі має дуже низьку вірогідність появи помилкових бітів. Проте, передача даних по безпроводовому каналу має ряд особливостей, внаслідок непередбачуваності умов передачі.

На кожному рівні моделі OSI використовуються певні механізми захисту від помилок. На рівні додатків (тобто в кодеку) ці механізми визначають якість відеопослідовності при декодуванні. В ранніх стандартах кодування, таких як H.261, H.263, MPEG - 1 Part 2 і MPEG - 2 Part 2 були застосовані різні форми сегментації кадру (слайс, блок) Причому при декодуванні спотвореного відеосигналу важливо враховувати властивості певного декодера. Згідно не усі декодери стандарту MPEG обробляють потік з помилками якісно. Деякі декодери здатні обробляти помилки з великою вірогідністю. Інші декодери не можуть декодувати потік з великою кількістю помилок, але потік з невеликою кількістю помилок декодують з хорошою якістю. Існують декодери, які декодують потік з помилками досить неякісно, незалежно від помилок і в цілому не підходять для роботи з таким типом потоку. У пізніших версіях кодеків, таких як H.263, MPEG - 4 Part 2 вже використовувався розподіл даних (DP), ефективним способом збільшення стійкості, що являється, до помилок. На даний момент в стандарт H.264/AVC додані такі механізми захисту від помилок як набір параметрів (SPS, PPS), FMO та ін.. На канальному рівні використовується зміна розміру пакету для зменшення втрат, диференційоване обслуговування та ін. На фізичному рівні використовується нерівний захист від помилок.

Бітові помилки, що виникають при передачі по безпроводових мережах, можуть по різному впливати на якість декодованого відео :

- Бітова помилка в різних частинах бітового потоку. Оскільки механізм стискування MPEG - 4 використовує видалення надлишковості у відеопослідовності, відносно низький рівень бітових помилок може істотно вплинути на якість декодованого відео. Кількість бітових помилок вище припустимого може істотно зменшити якість;

- Бітова помилка в заголовку відеопослідовності. Заголовок відеопослідов-

ності включає важливу інформацію, таку як дозвіл кадру, число кадрів, і таблицю квантування;

- Бітова помилка в заголовку зображення. При помилці в заголовку декодер може не розпізнати початок кадру. У гіршому разі кадр буде втрачений. У інших випадках, при часовому передбаченні, можуть виникнути серйозні погіршення якості;

- Бітова помилка в групі кадрів GOP. Помилка в GOP або в його заголовку не є істотним для правильного декодування відео;

- Бітова помилка в коефіцієнтах DCT. Якщо спотворюється частина коефіцієнтів DCT, то це може привести до «неправильного декодування» кодів змінної довжини VLC (від англ. Variable - Length Coding).

Оскільки кодеки обробляють інформацію поблочно, то мінімальною одиницею спотворення відеопотоку при дії поодинокі помилки є блок (4x4 або 16x16 залежно від кодування). Наступною областю поширення помилки є макроблок і слайс. Таким чином, поодинокі помилки при передачі може викликати поширення помилки не лише в актуальному макроблоку, але в слайсі і далі в кадрі. У було експериментально показано, що менший розмір слайса при кодуванні істотно підвищує якість зображення при втраті пакетів.

Існує три можливі джерела поширення помилки [6]:

- Просторове передбачення: відновлений при декодуванні макроблок, у якого сусідні макроблоки спотворені, також буде спотворений;

- Часове передбачення: якщо кадр спотворюється, то наступні кадри, що використовують спотворений кадр як початковий, також будуть спотворені;

- Кодування ентропії: оскільки використовуються коди VLC, помилка в ключовому коді може впливати на наступні коди, якщо межі ключового коду визначені неправильно. Таким чином порушується синхронізація наступних кодів, що спричиняє за собою нездатність декодера розрізнити ключові коди.

Використання VLC призводить до розсинхронізації декодованої інформації, призводячи до того, що частина інформації до наступного коду стає не декодованою. В деяких випадках навіть після відновлення синхронізації декодований сиг-

нал не може бути коректно використаний, оскільки втрачена додаткова інформація про спосіб її використання, наприклад тип кадру або вектору руху.

Спотворення, що виникають в результаті дії помилок при передачі і подальшого декодування, визначаються наступними термінами: блоковість зображення (англ. tiling), нечіткість (англ. blurring), помилки перенесення (англ. color errors) кольорів, помилкові блоки (англ. error block), тремтіння (англ. jerkiness), ефект «комарів» (англ. mosquito noise), шум квантування (англ. quantization noise), розмитість (англ. smearing).

Крім того, при передачі відеопотоку в реальному часі існують певні проблеми пов'язані з візуальним контролем якості, контролем швидкості/затримки, контролем помилки і масштабованістю.

1.3 Моделі помилок в мережах широкосмугового безпроводового доступу

Помилки цифрового потоку, що виникають при передачі на фізичному рівні безпроводових мереж умовно можна розділити на два види:

- поодинокі бітові помилки;
- пакет бітових помилок.

Поодинокі бітові помилки виражаються у вигляді інверсії біта при передачі, що спричиняє за собою неправильне розпізнавання послідовності і байта в цілому. Пакетом бітових помилок називається послідовність помилок завдовжки більше двох інвертованих бітів в сегменті даних. Пакетні бітові помилки відбуваються частіше, ніж поодинокі. Довжина пакету помилок вимірюється від першого до останнього інвертованого біта.

Бітові помилки найбільш прості і легко усувні спотворення цифрового потоку. Проте, в деяких випадках вони можуть привести до втрати цілого сегменту даних. Таким чином, не усунення бітових помилок на фізичному рівні спричинить втрату інформаційного (транспортного) пакету на канальному рівні і називатиметься як:

- помилка інформаційного пакету.

Причини втрати інформаційних пакетів можуть бути наступними:

- Аналогова і електромагнітна інтерференція, імпульсні перешкоди. Як правило, виникають унаслідок зовнішніх чинників, включаючи погодні умови і безпосередню близькість електричного устаткування. Механізми коригування помилок на фізичному рівні не завжди здатні усувати наслідки дії, що у свою чергу, призводить до втрати транспортного пакету. Застосування спеціальних способів захисту від інтерференції спричиняє за собою зменшення смуги пропускання і збільшення вартості устаткування.

- Короточасні зміни смуги пропускання. Пов'язані з поганим з'єднанням комутованого устаткування. Обмеження QoS обов'язково зачіпають межі смуги пропускання, вихід за межі яких може викликати втрату пакету за відсутності управління. Сильний джиттер або пульсуючий трафік може переповнити буфер і, услід за тим, здатність обробляти послідовність пакетів, призводячи до втрати, або до несвоєчасного отримання і обробки.

- Проблеми обладнання. Можуть бути викликані неправильною роботою пристроїв, паразитним зв'язком між компонентами, і несвоєчасною обробкою пакетів внаслідок джиттера.

Для імітації цих помилок застосовують різні моделі, які по-різному впливають на передавану інформацію.

Модель AWGN [7]. Оскільки безпроводові канали зв'язку характеризуються випадково розподіленими і незалежними бітовими помилками при імітації безпроводового каналу, часто застосовують модель «аддитивного білого шуму» Гауса або AWGN (від англ. Adaptive White Gaussian Noise), при якій певний біт в послідовності спотворюється (інвертується) із заданою вірогідністю. Використовуване значення описують вірогідністю появи помилкових біт BER (від англ. Bit Error Rate). Прийнятий в каналі AWGN сигнал може бути представлений як $r(t) = s(t) + n(t)$, де $s(t)$ - переданий сигнал; $n(t)$ - шумовий сигнал, що має середнє значення Про і спектральну щільність потужності шуму $N_0/2$, Вт/Гц.

Модель AWGN не здатна імітувати канал, схильний до завмирань. Загасан-

ня передаваного сигналу призводить до пакетування (групуванню) помилок. Оскільки більшість сучасних кодеків використовують VLC, немає особливого сенсу розділяти бітові і групові помилки, оскільки у будь-якому випадку для декодера помилки проявлятимуться у втраті або спотворенні цілої групи послідовних бітів. Проте існує відмінність в дії різних типів помилок на різні частини відеопотоку. Наприклад, поодинокі помилки в заголовку може викликати більше спотворення, чим група помилок в декількох блоках.

Модель GE. Іншою найбільш відомою моделлю помилок є модель Гільберта. Ця модель представляє канал у вигляді двох станів: «хорошого» і «поганого». У хорошому стані біт або пакет приймається успішно, тоді як у поганому стані - втрачається. При цьому відповідає вірогідність переходу між станами p_{01} і p_{10} . У хорошому стані вірогідність помилки/втрати $p_{\text{хор}}$ дорівнює нулю. У поганому стані помилка/втрата відбувається з незалежною вірогідністю $p_{\text{пг}}$. Так, щоб повністю описати модель Гільберта, потрібно три параметри: p_{01} , p_{10} , і $p_{\text{пг}}$. Проте часто неправильно розуміється те, що в моделі Гільберта поганий стан відповідає стану помилки/втрати, тобто $p_{\text{пг}} = 1$. Це відповідає простій марківській моделі з двома станами, що враховує тільки поодинокі помилки/втрати. Тому не можуть бути змодельовані групи помилок або їх пакетування.

Модель Гільберта була доповнена Еліотом, яку сьогодні називають моделлю Гільберта-Еліота (GE). Ця модель приймає малу і незалежну вірогідність помилки/втрати відмінну від нуля $p_{\text{хор}} > 0$ навіть у хорошому стані. Таким чином, для повного опису моделі потрібно чотири параметри.

Модель Гільберта-Еліота можна описати матрицею P . Нехай s_n є марківським процесом і відповідає $s_n = 0$ якщо канал знаходиться в змозі «добре» в n -ий момент часу, і $s_n = 1$ інакше. Таким чином матриця переходу виглядатиме як

$$P = \begin{pmatrix} P[s_n = 0 | s_{n-1} = 0] & P[s_n = 1 | s_{n-1} = 0] \\ P[s_n = 0 | s_{n-1} = 1] & P[s_n = 1 | s_{n-1} = 1] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

Вірогідність середньої втрати і середня довжина помилок обчислюється як

$$P_{\text{втр}} = \frac{p_{01}}{p_{10} + p_{01}}, \quad L_{\text{пом}} = \frac{1}{p_{10}}. \quad (1.2)$$

Моделі AWGN і Гільберта-Еліота можливо використовувати як на фізичному рівні стосовно біт, так і на каналному, стосовно транспортних пакетів. Їх часто використовують в експериментальній оцінці імітованих каналів зв'язку, внаслідок різного впливу на відеопотік (рис. 1.11), проте вони не здатні моделювати усі помилки.

Найбільш реалістичним і точним способом моделювання статистики помилок на каналному і фізичному рівні є використання цієї вірогідності, отриманої з реальної мережі.

Навіть якщо випадки виникнення помилок відбуваються рідко, вони викликають істотні проблеми у візуальній якості потокового відео, тоді як в інших типах послуг вони залишаються непомітними.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПОТОКОВОГО ВІДЕО В СИСТЕМАХ ШБД

2.1 Оцінка якості потокового відео

Для правильного декодування відеопотоку, що пройшов через ненадійне середовище передачі даних, застосовуються різні методи виправлення помилок, які по-різному впливають на візуальну якість. Оскільки відеопотік (у більшості випадків) - аудіовізуальне середовище, можуть виникнути додаткові проблеми, пов'язані з якістю звуку і синхронізацією з відео. При оцінці якості необхідно розглядати різні компоненти [7]:

- Якість відео - показник візуальної якості зображення;
- Якість аудіо - показник сприйняття звуку;
- Аудіовізуальна (мультимедійне) якість - показник, що порівнює якість зображення, якість звуку, і їх синхронізацію.

На додаток до цим показником сприйняття необхідно розглядати:

- Якість передачі - показник мереж зв'язку достовірно транспортувати відео. Цей показник відбиває здатність мережі до обслуговування, а не якість певного відеопотоку, і не залежить від типу використовуваного кодека.

Існують різні методи, що дозволяють кількісно і якісно оцінити характеристики закодованого відео. Показники якості відео можуть бути отримані за допомогою суб'єктивних або об'єктивних методів.

Вимір якості сприйманого відео робиться з використанням методів суб'єктивних шкал. Умовою для таких вимірів є наявність сенсу, тобто те, що існує зв'язок між фізичними характеристиками «дії», в даному випадку відеопослідовності, що представляється суб'єктові при тістї, і величиною і природою відчуття, викликаного дією. Підсумковий вибір одного з цих методів для певного застосування залежить від декількох чинників, таких як зміст, цілі і де в процесі виконання тесту він виконується. Найбільш популярними є наступні методи: 1) подвійна шкала DSIS (від англ. Double Stimulus Impairment Scale); 2) шкала безпере-

рвної оцінки якості DSCQS (від англ. Double Stimulus Continuous Quality Scale); 3) оцінка відео з використанням порівняльної шкали SCACJ (від англ. Stimulus Comparison Adjectival Categorical Judgement); 4) суб'єктивний метод оцінки якості відео SAMVIQ (від англ. Subjective Assessment Method for Video Quality evaluation); 5) безперервна оцінка якості MSUCQE (від англ. MSU Continuous Quality Evaluation).

Традиційно суб'єктивна якість відео визначається шляхом експертної оцінки і підрахунком середнього балу MOS (від англ. Mean Opinion Score) від 1 до 5 (шкала ITU), де 1 - найгірше, а 5 - найкраща отримана якість відео. Цей підхід, проте, вимагає певних експертних навичок і тому не використовується в автоматизованих системах.

Для проведення суб'єктивного тестування потрібне наступне: 1) вибрати відеопослідовності для тестування (зазвичай використовується відео близько 8 - 10 з, щоб запобігти розсіюванню уваги експертів і скоротити загальний час експериментів); 2) вибрати налаштування порівнюваних систем обробки відео; 3) вибрати метод тестування; 4) запросити достатнє число експертів (рекомендується не менше 15); 5) отримати остаточні оцінки, ґрунтуючись на думці експертів.

Методи об'єктивної оцінки якості цифрового відео підрозділяються на три категорії. У методах першої категорії оцінка якості відбувається при порівнянні декодованої відеопослідовності з початковою. Об'єктивність цих методів полягає в тому, що безпосереднього людського втручання не відбувається; обчислення спотворення робиться автоматично. Друга категорія включає методи, які порівнюють характеристики оригінальної і декодованої відеопослідовності. Методи третьої категорії оцінюють тільки декодоване відео. Група експертів по відеоякості VQEG (від англ. Video Quality Experts Group) називає їх повним, зменшеним і незалежним методами. Оцінка якості відео, заснована на цих відеотрас, може бути охарактеризована як повний метод.

Традиційні показники спотворення сигналу для визначення якості системи використовують абсолютну різницю між оригінальним і обробленим сигналом. Об'єктивна якість відео зазвичай вимірюється середньоквадратичною помилкою

MSE (від англ. Mean Square Error) і піковим відношенням сигналу до шуму PSNR (від англ. Peak Signal - To - Noise Ratio), який обчислюється з MSE і є логарифмічним показником інверсії цього заходу. MSE і його похідний показник PSNR є традиційними метриками, що дозволяють порівнювати будь-які два зображення. Показник RMSE називається спотворенням і PSNR - якістю. В порівнянні з іншими об'єктивними показниками PSNR легко обчислюється і найбільш зрозумілий більшості користувачів.

Якість відео вимірюється середньоквадратичною помилкою MSE і піковим відношенням сигналу до шуму PSNR між початковими $I(x, y)$ і закодованими і згодом декодованим $\hat{I}(x, y)$ відеокадрами. Чим більше відмінність між $I(x, y)$ і $\hat{I}(x, y)$, тим нижче значення PSNR, що виражається в децибелах, згідно візуальної логарифмічної чутливості ока людини. PSNR зазвичай обчислюється для яскравості, оскільки око людини найбільш чутливе до цього компонента.

Розглянемо відеопослідовність, що складається з N кадрів з дозволом $D_x \cdot D_y$ пікселів (наприклад, для CIF (Common Intermediate Format) $x = 288$ $y = 352$ і для QCIF (Quarter CIF) $x = 144$ $y = 176$). Нехай $I(n, x, y)$, $n = 0, \dots, N - 1$, $x = 1, \dots, D_x$; $y = 1, \dots, D_y$ означає яскравість (компонента Y) пікселя з координатами (x, y) у відеокадрі n . При цьому будуть справедливі формули

$$MSE_n = \frac{1}{D_x D_y} \sum_{x=1}^{D_x} \sum_{y=1}^{D_y} [I(n, x, y) - \hat{I}(n, x, y)]^2, \quad (1.3)$$

$$PSNR_n = 10 \log \frac{255}{MSE_n}. \quad (1.4)$$

Величини MSE і PSNR є довідковими показниками відеоякості. Вони обоє потрібні, щоб визначити відеоякість початкових відеокадрів на додаток до декодованих відеокадрів. В той же час ці показники враховують оцінку відеоякості без фактичного потоку двійкових сигналів. У табл. 2.1 представлена відповідність суб'єктивної (MOS) і об'єктивної (PSNR) оцінки [8].

Відповідність PSNR і MOS

PSNR, дБ	MOS, %	Якість за шкалою ITU	Погіршення зображення
Більше 37	81-100	5 Чудове	Непомітно
31-37	61-80	4 Хороше	Помітно, але не дратує
25-31	41 - 60	3 Задовільне	Злегка дратує
20-25	21-40	2 Погане	Дратує
менше 20	0-20	1 Дуже погане	Сильно дратує

Проте обидва показники не відповідають суб'єктивній якості відновленого зображення і належним чином не відбивають малі відмінності погіршення інтенсивності.

Обчислення спотворення при оцінці руху, засноване на показнику помилковості пікселя, не повною мірою відповідає візуальному сприйняттю людини. Доведено, що показник SSIM (від англ. Structural Similarity Image Measure) може забезпечити краще віддзеркалення значення спотворення зображення, чим нині використовувані PSNR або MSE.

Показник структурної схожості SSIM найбільш близький до людського сприйняття отриманої відеопослідовності. При його застосуванні використовується візуально сприймане структурне спотворення, тоді як більшість інших запропонованих методів ґрунтуються на чутливості до помилок. Показник SSIM визначає схожість трьох компонент зображення: яскравість, контраст і структурна схожість.

Знання особливостей людського зору дозволяє будувати об'єктивні метрики оцінки якості відео, що найбільш близько корелюють з суб'єктивними оцінками.

Якість відео може контролюватися під час передачі. Залежно від об'єктивних показників відбувається налаштування параметрів і, при нагоді, ретрансляція даних. Перевагою цього підходу є можливість автоматизації процесу тестування, що дозволяє вимірювати якість обробки відеосистеми при великій кількості різних налаштувань або вимірювати якість в реальному часі. Також в результаті вимірів виходять точні і відтворні дані. Недолік цього підходу в тому, що

автоматичні метрики можуть невірно відбивати суб'єктивно сприйману якість. Це може привести, наприклад, до невірного висновку про перевагу одного кодека над іншим.

До метрик можна пред'явити декілька вимог:

- Релевантність метрики. Суб'єктивно «кращим» відеофрагментам повинне відповідати «краще» значення метрики. Цю характеристику можна виміряти кількісно, наприклад, за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона.
- Монотонність метрики. У ідеальному випадку різниця між двома об'єктивними оцінками відеофрагментів повинна мати той же знак, що і різниця між двома суб'єктивними оцінками цього матеріалу. Оцінюється ранговим коефіцієнтом кореляції Спирмана.
- Узгодженість метрики. «Відхилення» значень від передбачених на основі суб'єктивних метрик значень не має бути великим. Обчислюється таким чином. Спочатку виконується ряд суб'єктивних оцінок відеофрагменту. Результати статистично обробляються, і знаходиться MSE оцінок. Потім обчислюються значення об'єктивних метрик, і знаходиться їх кількість, які відстоять від суб'єктивних оцінок на відстані більш ніж подвоєне значення MSE.

Існує шість класів об'єктивних метрик якості зображень [5]: 1) піксельні; 2) кореляційні; 3) контурні; 4) спектральні; 5) контекстних; 6) особливостей людського зору, що враховують.

Використання описаних метрик і показників оцінки якості відтворення відео на практиці ускладнене через відсутність апріорної інформації про багато супутніх чинників. Внаслідок цього оцінка впливу умов передачі на якість відтворення зображень при декодуванні можлива лише при проведенні імітаційного моделювання.

Зокрема, для оцінки якості декодування при передачі відео у безпроводових мережах пропонується використовувати наступну методику:

- 1) початкова відеопослідовність кодується кодеком;
- 2) відеопотік перетвориться в транспортний потік (модулюється);

- 3) транспортний потік передається через безпроводову мережу;
- 4) спотворений потік декодується в приймачі;
- 5) робиться оцінка декодованого відеопотоку.

Структурна схема алгоритму оцінки відео при передачі по безпроводовій мережі, що реалізовує викладену методику, представлена на рис. 2.1.

При імітації можуть бути використані загальнодоступні траси однорівневого і дворівневого кодованого відео з використанням часової і просторової масштабованості.

Імітатор безпроводової мережі може бути виконаний в програмному середовищі Matlab Simulink, наприклад, у разі WiMAX з обов'язковою реалізацією усіх елементів OFDM фізичного рівня, визначеними в стандарті IEEE 802.16-2004.

Порівняння отриманого декодованого (спотвореного) і оригінального потоків може бути здійснено, наприклад, за допомогою програми MSU Video Quality Measurement Tool. З цією метою в програмі передбачено використання метрик PSNR, SSIM і спеціально розроблених метрик для виміру різкості і міри блокової. Основною метрикою для об'єктивної оцінки якості декодованих послідовностей є метрика PSNR, застосована до Y-компоненти, як найбільш значимої для сприйняття.

2.2 Дослідження програмно-апаратного комплексу для оцінки якості потокового відео

Більшість сучасних телекомунікаційних систем надають послуги передачі відео в реальному часі, при цьому питання про якість відео є дуже важливим. Відома безліч публікацій, присвячених механізмам забезпечення необхідної якості обслуговування (QoS), проте лише в деяких з них вдалося досягти задовільних результатів, що мають практичне значення, оскільки вплив параметрів QoS на якість передачі відео неможливо однозначно визначити через велике розмаїття схем кодування, методів відновлення після помилок або обробки.

У деяких роботах для оцінки якості відео часто використовують синхронізацію кадрів на передавальній і приймальній стороні, що означає відсутність можливості оцінки якості у разі втрати кадрів або помилок декодування. Відомі способи оцінки якості відео, спотвореного передачею, наприклад, проте їх програмне забезпечення (ПЗ) недоступно масовому користувачеві.

Основною метою досліджень ефективності передачі відеопотоків в мережах безпроводового доступу є оптимізація декодування за критерієм «швидкість кодування - спотворення» R - D (від англ. Rate - Distortion). Цей критерій характеризує ефективність цифрової передачі відео і якість декодування на прийомі. Для правильного декодування відеосигналу, що пройшов через ненадійне середовище передачі даних, застосовуються різні методи виправлення помилок, які по-різному впливають на якість отриманого зображення. Існують різні методики, що дозволяють кількісно і якісно оцінити характеристики закодованого відео.

Як правило, відеодані можуть бути представлені в декількох формах [8]:

- фактичний закодований потік двійкових сигналів, зазвичай великого розміру, захищений авторським правом і вимагаючий експертизи при кодуванні/декодуванні, що утрудняє його поширення серед користувачів;
- відеотраси, що містять у бітовому потоці інформацію про закодоване відео (але не фактичну закодовану інформацію), і вільно поширюваний серед користувачів;
- у вигляді моделей відеотрафіку, заснованих на відеотрасах з певними статистичними властивостями, що обмежують користувача у виборі сюжету (наприклад, спорт, новини).

Відеотраси дають можливість досліджувати мережі без застосування дорогої апаратури і програмного забезпечення. В той же час вони набагато менше за об'ємом, чим закодоване відео, і легко можуть бути використані при моделюванні.

Нескладна інтеграція відеотрас у будь-яку систему передачі лягла в основу розробки програмно-апаратного комплексу (ПАК) для оцінки якості відео, що передається по реальних або імітованих мережах зв'язку. Модульна структура Паку

дозволяє змінювати на розсуд користувача, як основної системи передачі, так і кодеків, що забезпечує широкий спектр експериментальних можливостей. Разом з оцінкою таких параметрів QoS мережі, як коефіцієнт втрат, затримка і джиттер, передбачена також оцінка якості отриманого відео, заснована на обчисленні показників PSNR і MOS.

На рис. 2.2 представлена структурна схема програмно-апаратного комплексу (ПАК) для оцінки якості потокового відео при передачі в різних телекомунікаційних мережах. У цій схемі відбита взаємодія між модулями при передачі цифрового відео від джерела через мережу зв'язку до глядача.

Для проведення оцінки якості необхідно мати дані відеофайлу до передачі по мережі (на передавальній стороні) і після прийому з мережі (на приймальній стороні) На передавальній стороні необхідними даними є: початкове некодоване відео у форматі YUV, закодоване відео у форматі MPEG - 4, а також час відправки і тип кожного відправленого до мережі пакету.

На приймальній стороні необхідно отримати наступні дані: час прийому і тип кожного прийнятого з мережі пакету, закодоване відео (можливо, спотворене) у форматі MPEG - 4 і декодоване відео у форматі YUV для відображення.

Оцінка даних робиться при порівнянні передаваної інформації з прийнятою. На практиці нестиснене відео може бути дуже великого об'єму, тому доцільно передавати тільки додаткову інформацію у вигляді файлу із записом часу отримання кожного пакету. Це зручніше, ніж передавати передавачу повний (спотворений і декодований) відео-файл з приймального боку.

Обробка даних здійснюється в три етапи. На першому етапі аналізується час прийому і відправки кожного пакету з обох боків і його тип. В результаті з'являється запис про тип кадру і часу між переданим і прийнятим пакетами. Крім того, файл спотвореного відео на приймальній стороні відновлюється шляхом використання оригінального закодованого відеофайлу і інформації про втрачених пакетах. Після чого відео декодується для відображення глядачеві. На цьому етапі виникає звичайна проблема оцінки якості відео. Показники якості відео завжди вимагають порівняння прийнятого (можливо, спотвореного) і такого, що відпові-

дає початкового кадру. У разі повної втрати кадру відсутня необхідна синхронізація кадрів до і після передачі по мережі.

На другому етапі обробки ця проблема вирішується на основі аналізу інформації про втрати. Синхронізація кадрів відновлюється шляхом додавання останнього відображеного кадру замість втрачених. Це дозволяє провести подальшу покадрову оцінку якості.

На третьому етапі для аналізу якості декодованого відео використовуються відновлений і початковий відеофайл.

2.3 Дослідження систем ШБД для передачі потокового відео за допомогою ПЗ NS-2

При моделюванні безпроводового каналу зв'язку необхідно враховувати безліч дестабілізуючих чинників середовища передачі, таких як накладення білого шуму (AWGN) гауса, багатопроменеве поширення, завмирання сигналу, інтерференція і множина інших. Неможливо представити сигнал, отриманий на приймачі, лише як початковий сигнал, неспотворений ніякими діями середовища. Результати і достовірність роботи моделі безпосередньо залежать від побудови каналу зв'язку, тому найбільш важливе використання у край точної моделі, наближеної до реальних умов.

Точну модель можливо отримати на прикладі розгорнутої мережі WiMAX стандарту IEEE 802.16e з використанням базової і абонентської станцій [9].

Моделювання помилок що виникають в реальній мережі можливо вивчити за допомогою імітаційного комплексу Network Simulator 2 (NS - 2), який дозволяє забезпечити необхідний рівень моделювання і отримати необхідні характеристики продуктивності мережі. NS - 2 задовольняє вимогам процесу гнучкого моделювання, оскільки поєднує в собі мову готових скриптів і мову програмування C++, за допомогою яких описуються об'єкти моделювання (вузли, канали, генератори фонового трафіку та ін.), що параметризуються з реальних вимірів. На

рис. 2.3 представлена функціональна схема взаємодії ПАК з NS - 2.

Мережа імітується програмою NS - 2, що включає декілька об'єктів (агентів). Об'єкт MyTrafficTrace використовується для обчислення типу і розміру кадру відеотраси, генерованого модулем ВП. Крім того, цей об'єкт розбиває відеокадри на пакети і відправляє їх на рівень UDP у відповідний час, згідно з параметрами налаштування користувача, визначеними при моделюванні [10].

По суті, MyUDP є об'єктом UDP. Цей об'єкт записує у файл траси, що відправляється, час передачі кожного пакету, ід пакету, і розмір корисного навантаження пакету. Робота об'єкту MyUDP аналогічна роботі програм TCP - dump або Win - dump, що проводиться в реальних мережах.

Об'єкт MyUDPSmk - об'єкт прийому пакетів фрагментованих кадрів, відправлених MyUDP. Цей об'єкт записує час, ід пакету і розмір корисного навантаження кожного отриманого пакету у файл траси прийому.

Варіант імітації широкопasmугової мережі безпроводового доступу стандарту IEEE 802.16 в пакеті програм NS - 2 показаний на рис. 2.4.

Особливістю представленої імітації безпроводової мережі є оцінка передачі відеопотоку без і з урахуванням впливу фонового трафіку Використовується два типи фонового трафіку - FTP і CBR FTP трафік передається по TCP протоколу із швидкістю передачі даних 512 кб/с. CBR трафік передається по UDP протоколу із швидкістю передачі даних 256 кб/с. Пропускна спроможність між відео сервером і базовою станцією дорівнює 2 Мб/с і із затримкою 10 мс.

Вбудовані засоби ПАК дозволяють робити імітацію двох основних типів помилок що виникають у безпроводових мережах:

1. Імітація бітової помилки. Імітація передачі по безпроводовому каналу з моделлю "аддитивного білого шуму" Гауса AWGN або моделлю Гільберта-Еліота GE (від англ. Gilbert - Elliott). При імітації певний біт в послідовності спотворюється (інвертується) із заданою вірогідністю. Використовуване значення вірогідності описують показником кількості помилкових бітів BER (від англ. Bit Error Rate). Генератор помилок eg.exe робить спотворення файлу траси передачі з певною вірогідністю і моделлю розподілу помилок таким чином:

eg.exe [траса передачі] [траса прийому] [відео траса] [модель помилок] [потік помилок]

Таким чином, генерується файл траси прийому з вказівкою втрачених пакетів.

2. Імітація помилки інформаційного пакету. Можна робити ручне видалення UDP пакетів з файлу траси прийому. Це дозволяє досліджувати роботу кодека і проаналізувати зміну візуальної якості при втраті інформаційних пакетів. При цьому приймальний і неспотворений файл можна отримати при передачі по "ідеальному" каналу з необмеженою смугою пропускання і відсутністю затримки і потім вручну видалити певні пакети.

2.4 Дослідження завадостійкості систем ШБД за допомогою ПЗ Matlab Simulink

Іншим зручним середовищем моделювання радіоканалу є програмне середовище Matlab і пакет візуального моделювання Simulink. Середовище Matlab є інтерактивною системою для виконання розрахунків, орієнтованою на роботу з масивами даних. Система використовує математичний співпроцесор і допускає можливість звернення до програм, написаних на мовах Fortran, C і C++. Пакет візуального моделювання Simulink є пакетом розширення середовища Matlab і дозволяє здійснювати моделювання поведінки динамічних лінійних і нелінійних систем шляхом графічної зборки будь-якої системи з окремих блоків, що зберігаються в стандартних бібліотеках Simulink [11].

Таким чином, Matlab Simulink дозволяє змоделювати складні системи каналу безпроводового зв'язку, такий як WiMAX IEEE 802.16, шляхом формування окремих блоків і підсистем, для яких можна задавати власні параметри.

Систему WiMAX в середовищі Matlab Simulink умовно можна представити у вигляді трьох основних частин: передавач, приймач і канал зв'язку (рис. 2.5).

Детальна блок-схема імітованої системи WiMAX представлена на рис. 2.6.

До основних параметрів, що впливають на завадостійку системи WiMAX, можна віднести наступні:

- Коефіцієнт кодування;
- Тип модуляційного маніпулювання;
- Швидкість пересування призначеного для користувача терміналу;
- Схема передачі по радіоканалу SISO/MIMO (Single - Input Single - Output/Multiple Input Multiple Output);
- Застосування допоміжних технологій AMC (Adaptive Modulation and Coding).

Результати імітаційного моделювання представлені у вигляді залежності вірогідності появи помилкових біт (BER) від співвідношення енергії одного біта E_b сигналу до спектральної щільності потужності шуму N_0 в каналі передачі. Цю залежність можна прийняти за міру ККД модельованої системи, із-за великих енергетичних витрат для передачі, при високому показнику співвідношення енергії на біт до шуму.

При моделюванні за умовчанням використовувалися наступні параметри каналу: Частота низхідних передач 2 ГГц; смуга пропускання каналу 20 МГц, коефіцієнт довжини циклічного префікса $G=1/16$, що відповідає невеликій затримці поширення сигналу; тип модуляції і коефіцієнт кодування, що відповідають режиму AMC3.

Параметри моделювання [12]:

- Зупинка моделювання досягши 5000 прийнятих помилкових біт;
- Зупинка моделювання досягши 10^6 прийнятих біт;

Граничні значення рівня E_b/N_0 [- 5;30] дБ з кроком 1 дБ.

Аналіз результатів моделювання.

Вплив коефіцієнта кодування. Алгоритми згортального кодування, застосовані в системах передачі даних, призначені для підвищення надійності передачі і істотно залежать від якості каналу. При незначних завмираннях і шумах можна не побоюватися за виникнення помилкових біт в каналі і, можливо, використовувати вищі коефіцієнти кодування аж до 1, що означає відсутність кодування.

Згідно специфікації стандарту IEEE 802.16, в системах передачі WiMAX використовуються три коефіцієнти кодування: 1/2, 2/3, 3/4.

При пониженні якості радіоканалу відбувається різке зниження достовірності передачі. Прийнятний рівень BER навіть близько 10^{-4} може бути досягнутий тільки при співвідношенні енергії на біт до шуму не менше 22 дБ; для досягнення гарантованого детектування знадобиться співвідношення близько 30 і більше дБ.

Спостерігати зниження рівня коефіцієнта бітових помилок при пониженні коефіцієнта кодування можна на графіку, показаному на рис. 2.7. При виборі оптимального коефіцієнта кодування варто враховувати не лише очікувану якість рівня радіоканалу, але і необхідну швидкість передачі даних. При пониженні коефіцієнта кодування збільшиться кількість додаткових біт в контрольній бітовій послідовності, генерованій блоком кодера каналу, що у свою чергу приведе до зниження рівня інформаційних біт в передаваному кадрі, зменшивши пропускну спроможність каналу.

Вплив типу модуляції. Специфікацією стандарту WiMAX визначено сім режимів роботи, що відповідають типам використовуваної модуляції і загальним коефіцієнтом кодування. Список режимів роботи приведений в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Схем модуляції і коефіцієнти кодування

Режим модуляції і кодування	Схема модуляції	Коефіцієнт кодування
AMC1	2-PAM	1/2
AMC2	4-QAM	1/2
AMC3	4-QAM	3/4
AMC4	16-QAM	1/2
AMC5	16-QAM	3/4
AMC6	64-QAM	2/3
AMC7	64-QAM	3/4

Використання кожного режиму модуляції і кодування пояснюється оптимальністю цього режиму при певних якісних параметрах каналу.

На рис. 2.8 приведені графіки залежностей коефіцієнта бітових помилок, отриманих в результаті моделювання з використанням різних режимів модуляції і кодування.

Високий рівень E_b/N_0 означає, що для передачі кожного біта необхідно витратити більшу кількість енергії. Схеми модуляції з низькою спектральною щільністю, такі як 2-PSK і 4-QAM, вимагають меншого рівня E_b/N_0 і є енергоефективнішими, у меншій мірі схильними до появи помилкових бітів.

Значення BER може бути оцінене за допомогою співвідношення [13]:

$$P_{bc} = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M_a}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3}{M_a - 1} \frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (2.17)$$

де P_{bc} - вірогідність бітової помилки на ту, що несе; M_a - визначає алфавіт схеми модуляції; $Q(x)$ - додаткова функція Гаусового розподілу.

Вплив швидкості пересування призначеного для користувача терміналу. Проведений аналіз зміни завадостійкої залежно від швидкості переміщення терміналу користувача відносно нерухомої базової станції.

Переміщення передавального терміналу в просторі під час передачі сигналу по радіоканалу супроводжується ефектом Доплера. Для хвиль, що поширюються у фізичному середовищі треба брати до уваги рух, як джерела, так і приймача хвиль відносно цього середовища. Для електромагнітних хвиль, для поширення яких не потрібно середовище, має значення тільки відносний рух джерела і приймача. Залежність довжини електромагнітної хвилі від швидкості пересування можна виразити як

$$\lambda = \frac{c - v}{\omega_0}, \quad (2.18)$$

де ω_0 - частота, з якою передавач випускає хвилі; c - швидкість поширення хвиль в середовищі; v - швидкість переміщення передавача відносно приймача з ураху-

ванням напряму руху.

У загальному випадку, при обліку переміщення і передавача, і приймача, реєстрована частота представляється у вигляді

$$\omega = \omega_0 \frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}, \quad (2.19)$$

У разі електромагнітних хвиль формулу для частоти виводять з рівнянь спеціальної теорії відносності

$$\omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}, \quad (2.20)$$

де c - швидкість світла; v - відносна швидкість передавача і приймача з урахуванням напряму руху; θ - кут між хвильовим вектором і швидкістю передавача.

Зрушення Доплера можна представити у вигляді відношення його максимального і мінімального значень у формі

$$f_d = f_c \frac{v}{c} \cos \theta, \quad (2.21)$$

де f_d - максимальне зрушення Доплера; f_c - частота несучої; v - швидкість пересування призначеного для користувача терміналу; c - швидкість світла; θ - кут між хвильовим вектором і швидкістю передавача.

Для аналізу впливу швидкості пересування на завадостійку передачі даних було проведено імітаційне моделювання системи, з урахуванням максимальної величини зрушення Доплера, однакового для усіх шляхів поширення сигналу реєстрованої моделі каналу, пересування передавача, що відповідає певним швидкостям, представленим в табл. 2.3 [14].

Відповідність максимальної величини зрушення Доплера і швидкостей пересування призначеного для користувача терміналу

Швидкість пересування, км/год	Максимальне зрушення Доплера, Гц
0	0
6	11,2
30	56
60	112
120	224

Як показано на рис. 2.9, швидкість пересування значною мірою впливає на завадостійку. Швидкості пересування до 12-13 км/год мають невеликий вплив на коефіцієнт помилок. Швидкості близько 30-60 км/год вже відчутно знижують надійність передачі. Швидкості вище 100 км/год абсолютно порушують передачу даних, оскільки при такій швидкості пересування вірогідність бітових помилок не нижче 10^{-1} .

Вплив схеми передачі по радіоканалу (SISO/MIMO). Головна проблема, що виникає при передачі радіосигналу - завмирання сигналу внаслідок багатопроменевого поширення. Алгоритми просторового мультиплексування покликані зменшити вплив завмирань в каналі на достовірність передаваних даних. Як показано на рис. 2.10 завадостійка передачі даних з MIMO росте в порівнянні з схемою SISO.

Аналіз отриманих результатів, представлених на рис. 2.11, показує, що введення додаткової передавальної антени позитивно впливає на завадостійку передачі, як некодованого інформаційного сигналу, так і закодованого на різних швидкостях.

Вивчений вплив технології MIMO на завадостійку системи WiMAX при використанні різних типів модуляції. В результаті послідовності запусків моделювання системи з різними параметрами, що визначають режим роботи і тип модуляції, були отримані залежності коефіцієнта бітових помилок від E_b/N_0 для кожно-

го режиму роботи системи в схемі MIMO, аналогічні залежностям в схемі SISO. Спостережуване істотне зниження коефіцієнта бітових помилок при застосуванні технології MIMO з будь-яким з режимів AMC підтверджує практичну цінність алгоритмів просторового мультиплексування.

Розглянутий вплив технології MIMO на завадостійку передачі сигналу при переміщенні передавального і приймаючого пристроїв один відносно одного. Розрахункове значення зрушення Доплера при цьому залишається тим же, але застосування декількох передавальних або приймаючих антен, теоретично повинно ослабити вплив ефекту Доплера на передачу і спростити знаходження еталонного виду сигналу на приймаючій стороні.

Як видно з порівняння графіків залежностей на рис. 2.12, застосування декількох передавальних і приймаючих антен підвищує вірогідність виникнення бітової помилки, при відносному переміщенні передавального і приймаючого пристроїв. Це видно з того, що приріст завадостійкої системи від застосування технології багатоантенної передачі безпосередньо залежить від частоти зміни каналних коефіцієнтів радіоканалу. При збільшенні швидкості руху канална матриця міняється з більшою частотою, а, отже, системі стає складніше впоратися зі збільшеним навантаженням на функціональний блок STC [13].

Розглянутий вплив на завадостійку збільшення кількості передавальних і приймаючих антен. Міру цього впливу прийнято, по рекомендаціях ITU - IT, вимірювати в зменшенні міри 10 коефіцієнта BER на кожні 10 дБ приросту відношення потужності сигналу до шуму.

Аналізуючи графіки залежностей, приведені на рис. 2.13, можна визначити, що міра впливу схеми передачі на завадостійку D можна описати формулою

$$D = N_T \cdot N_R, \quad (2.22)$$

де N_T - кількість передавальних антен; N_R - кількість приймаючих антен.

З графіків видно, що схеми передачі несиметричні; тобто схема з двома приймаючими антенами випереджає схему з двома передавальними антенами по

завадостійкій приблизно на 2 дБ SNR.

Таким чином, застосування технології MIMO при побудові системи WiMAX має безліч переваг, серед яких:

- збільшена в порівнянні з схемою SISO стійкість до виникнення внаслідок завмирань в радіоканалі помилкових бітових блоків в сигналі, що приймається;
- збільшена в порівнянні з схемою SISO пропускна спроможність системи в цілому за рахунок одночасної передачі декількох символів OFDM в один період часу при використанні декількох передавальних радіоантен;
- краща стійкість до впливу з боку ефекту Доплера.

Вплив застосування допоміжних технологій (AMC). Проведений аналіз наслідків застосування механізму адаптивної модуляції і кодування на завадостійку і продуктивність системи WiMAX. Міра корисності введення цього механізму визначається шляхом порівняння з аналогічними показниками, отриманими в результаті моделювання з фіксованим режимом AMC.

Параметри системи, використовувані при моделюванні: динамічний режим роботи AMC і пусковий режим роботи AMC1, що означає, що передача першого пакету даних здійснюється в найбільш завадостійкому режимі, щоб забезпечити надійність передачі в умовах невизначеності каналних коефіцієнтів.

З результатів моделювання, представлених на рис. 2.14, видно, що застосування механізму AMC не дозволяє повністю усунути вірогідність бітових помилок, а лише підтримує коефіцієнт BER нижче визначеного рівня за рахунок динамічної зміни типу модуляції і швидкості кодування. Такий підхід дозволяє автоматично вибирати більше енергетично вигідний режим роботи системи, спираючись на дані про перешкоди в радіоканалі, і в результаті система придбаває схему раціональнішого використання виробничих потужностей і пропускної спроможності радіоканалу, жертвуючи невеликим зниженням завадостійкої [14].

Головну роль при виборі режиму AMC для наступної передачі служить таблиця граничних значень SNR у функціональній підсистемі AMC. Таблиця, приклад якої представлений в табл. 2.4, дозволяє вибрати режим роботи, спираючись на необхідний рівень коефіцієнта BER.

Механізм адаптивної модуляції і кодування спрямований на підстроювання системи під стан каналу, з чого виникає питання надійності цього механізму при виникненні дестабілізуючих чинників, викликаних самим передавальним або приймаючим пристроєм, наприклад ефектом Доплера.

Зі збільшенням швидкості руху коефіцієнт помилок також відчутно зростає. Пояснюється це тим, що при збільшенні зрушення Доплера функціональним модулям, що забезпечують реалізацію механізму AMC, необхідно набагато швидше перемикатися з одного режиму роботи в інший. Внаслідок цього затримка зворотного зв'язку між передавачем і приймачем стає визначальним чинником якості роботи усього механізму в цілому.

Таблиця 2.4

Граничні значення SNR для забезпечення рівнів BER 10^{-1} і 10^{-2}

Режим роботи	BER 10^{-1}	BER 10^{-2}
AMC1	<3 дБ	< 5 дБ
AMC2	3 дБ - 6 дБ	5 дБ - 7 дБ
AMC3	6 дБ - 9 дБ	7 дБ-11 дБ
AMC4	9 дБ - 12 дБ	11 дБ- 14 дБ
AMC5	12 дБ-16 дБ	14 дБ - 18 дБ
AMC6	16 дБ- 18 дБ	18 дБ-20 дБ
AMC7	> 18 дБ	>20 дБ

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ НА ЯКІСТЬ ПОТОКОВОГО ВІДЕОСТАНДАРТУ H.264/AVC ПРИ ПЕРЕДАЧІ В СИСТЕМАХ ШБД

3.1 Експериментальні дослідження якості відеостандарту H.264/AVC при передачі по мережі ШБД за допомогою ПАК

Одними з найважливіших параметрів QoS для безпроводових мереж є вірогідність появи бітових BER (від англ. Bit Error Rate) і пакетних PER (від англ. Packet Error Rate) помилок. Поодинокі втрати пакетів також як і поодинокі бітові помилки не здатні імітувати канал, схильний до завмирань. Як правило, помилки часто є довготривалими, оскільки висока вірогідність втрати пакетів відбувається в специфічний період передачі, наприклад при поганому поширенні. Загасання передаваного сигналу призводить до групування помилок. Групою помилкових пакетів називають послідовність пакетів, не отриманих або отриманих з помилкою при передачі по каналу зв'язку в певний проміжок часу. У зв'язку з цим введено поняття довжини групи помилок BEL (від англ. Burst Error Length).

Довжина групи помилок визначається як число від першого до останнього помилкового пакету включно в певній групі помилок [15].

Зміна характеристик широкосмугових каналів зв'язку безпосередньо залежить від розташування джерел прийому і передачі в умовах міської інфраструктури. Збільшення мобільності засобів прийому і відправки відеоінформації в прямому ефірі призводить до того, що інформаційна послідовність (набір пакетів) частково не доходить до абонентів, що призводить до спотворень відео зображення або будь-якої іншої інформації. Оцінка поведінки втрат в часі є істотною проблемою, оскільки це один з найважливіших параметрів, що впливає на поширення інформації в межах мережі. Складність моделі зростає при точнішому описі даних, отриманих при експериментальних вимірах.

Для оцінки впливу рухливості абонентів була розгорнута мережа WiMAX стандарту IEEE 802.16e з використанням базової і абонентської станцій. Базова

станція (БС) встановлена на даху 23-поверхової будівлі. Використовуються крос-поляризовані антени з коефіцієнтом посилення 9 дБ, ширина діаграми спрямованості 90 гр. Азимут напрямку антени дорівнює 300 гр. Пересувна абонентська станція (АС) була встановлена в автомобілі. Дві антени АС з круговою діаграмою спрямованості і коефіцієнтом посилення 2 дБ були встановлені на даху автомобіля. Запис зображення з відеокамери робився в автомобілі, що рухався, на ноутбук і одночасно транслювалася на віддалений комп'ютер через мережу WiMAX.

Середня швидкість руху автомобіля складала 60 км/год. Максимальне віддалення від базової станції рівне 950 м. На більшому протязі маршруту між БС і АС відсутній пряма видимість, тим самим головними причинами виникнення перешкод при трансляції є віддзеркалення, дифракція, розсіювання та ін. Маршрут руху автомобіля і розташування БС приведені на рис 3.1.

Для побудови мережі WiMAX і трансляції відеопотоку використовувалося наступне устаткування: Базова станція RuggedMAX WiN7000. Смуга використовуваних частот 1350 - 1400 МГц, відповідність WiMAX Forum Wave 2 Profile, IEEE 802.16e OFDMA, метод ущільнення TDD, максимальна потужність передачі 36 дБм. Абонентська станція RuggedMAX WiN5100. Смуга використовуваних частот 1350 - 1400 МГц, відповідність WiMAX Forum Wave 2 Profile, IEEE 802.16e OFDMA, метод ущільнення TDD, максимальна потужність передачі 23 дБп. Ноутбук DELL Latitude D430. Веб-камера Logitech QuickCam Pro 9000 [16].

Відео транслювалося впродовж 30 хвилин з характеристиками, представленими в табл. 3.1.

Характеристик закодованого відео

Формат	mp4
Кодек	H.264
Бітрейт	Постійний 600 кбіт/с
Частота кадрів	25 кадрів/с
Розподільча здатність	640x480
Тип GOP	ІВВРВВРВВ

Трансляція по мережі здійснювалася за допомогою сервера потокового мовлення DarwinStreamingServer і медіа плеєра QuickTimePlayer компанії Apple .. Інформація про передаваних і прийнятих з мережі пакетів робилося за допомогою аналізатора протоколів Wireshark. Синхронізація переданої і прийнятої відеопослідовності робилася за допомогою програми VirtualDub.

Використовувані при трансляції відео протоколи і їх статистичні параметри, вичислені за допомогою програми Wireshark, показані на рис. 3.2.

В результаті дії перешкод спостерігалось погіршення якості трансльованого відеопотоку. Оцінка якості робилася за допомогою показників PSNR і MOS, вичислених за допомогою інструментів програмно-апаратного комплексу.

Обробка файлів переданих і прийнятих пакетів RTP при передачі відео (30 мін) по мережі WiMAX показала, що загальна кількість RTP пакетів складає - 281720 шт., з них 2590 (0,92%) відсутні. Інформація про параметри трансляції потокового відео приведена на рис. 3.3 [17].

3.2 Вплив бітових помилок на візуальну якість потокового відео

Безпроводові канали зв'язку характеризуються випадково розподіленими і незалежними бітовими помилками. Для імітації безпроводового каналу з цим типом помилок часто застосовують модель "адитивного білого шуму" Гауса або AWGN, при якій певний біт в послідовності спотворюється (інвертується) із зада-

ною вірогідністю. Використовуване значення описують вірогідністю появи помилок бітів BER [18].

Таблиця 3.2

Покадрове порівняння отриманої якості

	К-ть кадрів	Максимальне значення PSNR, дБ	Мінімальне значення PSNR, дБ	Середнє значення PSNR, дБ	Дисперсія PSNR, дБ
Загальне	45066	47,12	13,72	31,58	6,77
I-кадри	5008	46,89	16,72	31,58	6,78
P-кадри	10014	47,12	13,72	31,58	6,76
B-кадри	30044	47,09	13,72	31,57	6,76

Різні значення BER по-різному впливають на якість потокового відео. При порівнянні початкового і спотвореного відеопотоку можливо вичислити вплив бітової помилки на кінцеву якість відео.

З метою дослідження впливу бітової помилки на отриману якість було проведене імітаційне моделювання передачі 30-хвилинного відео (табл. 3.1) через широкосмугову безпроводову мережу стандарту IEEE 802.16 з випадковими бітовими помилками в каналі. Схема експерименту показана на рис. 3.7.

Кодування/декодування початкової відеопослідовності в стандарт H.264 робилося за допомогою кодека MP4, що входить в структуру ПАК. Моделювання безпроводової мережі з випадковими бітовими помилками в каналі робилося за допомогою програми VCDemo. Імітація передачі відео потоку через безпроводову мережу виконувалася згідно моделі OSI на відомих рівнях: прикладному, транспортному, мережевому, каналному і фізичному.

На прикладному рівні моделі OSI робиться кодування/декодування і пакування відеопотоку. Відеопотік ділиться на пакети змінної довжини розміром до 1500 байтів, додаючи при цьому 12-байтовий заголовок RTP. При додаванні заголовка RTP до даних, бітовий потік MPEG сегментується так, щоб стартові коди

MPEG містилися на початку пакетів даних.

На транспортному рівні моделюється протокол UDP, відповідно додаючи заголовок і контрольну суму (8 байт). І далі на мережевому рівні додається 20-байтовий заголовок IP.

На каналному рівні зв'язку моделюється протокол IEEE 802.16. Швидкість передачі каналу встановлюється рівною 20 Мб/с.

І нарешті, на фізичному рівні, робиться імітація випадкової бітової помилки в каналі (шум гауса) із заданою вірогідністю BER.

Для проведення моделювання закодований відеопотік був розбитий на RTP/UDP-пакети за допомогою інструментів програмно-апаратного комплексу.

Оцінка якості робилася за допомогою показників PSNR і MOS, вичислених за допомогою інструментів програмно-апаратного комплексу [3, 17]. Стандартна девіація якості по середніх значеннях PSNR вичислена по формулі

$$S'_{\text{PSNR}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\text{PSNR}_n - \overline{\text{PSNR}}_n' \right)^2}, \quad (3.1)$$

де N - номер кадру, $\overline{\text{PSNR}}_n'$ - середнє значення якості відеопослідовності. На рис. 3.8 показаний вплив показника BER на якість потокового відео.

Показані діапазони значень BER, у межах яких отримана якість була максимальною, тобто дорівнювало початковому, і мінімальним. Показано, що при $\text{BER} < 3 \cdot 10^{-5}$ помилка не впливає на візуальну якість і може бути легко усунена декодерами і існуючими способами захисту від помилок. Подальша зміна якості носить ступінчастий (послідовний) характер і зменшується при збільшенні BER. При $\text{BER} = 4 \cdot 10^{-3}$ втрати пакетів досягають максимального значення і складають більше 99,9% від загального числа.

Аналізуючи результати передачі потокового відео по імітованій безпроводовій мережі з різними значеннями BER можна зробити наступні висновки:

1) При імітації безпроводового каналу з моделлю AWGN число бітових помилок $\text{BER} < 3 \cdot 10^{-5}$ не впливає на якість відеопотоку. При $\text{BER} > 4 \cdot 10^{-3}$ втрати па-

кетів в мережі досягають максимального значення і складають не менше 99,9%.

2) Можна гарантувати об'єктивну чудову якість відеопотоку при передачі по каналу з вірогідністю появи бітової помилки не більше $1 \cdot 10^{-4}$, хороша якість в діапазоні $1 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-1}$, задовільна якість в діапазоні від $4 \cdot 10^{-4} \dots 8 \cdot 10^{-4}$, погана якість в діапазоні $8 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ і дуже погане при більше $1 \cdot 10^{-1}$;

3) Середня якість трансляції відеопотоку по реальних безпроводових мережах схильним спотворенням (наприклад, при русі в умовах міста) порівнянна імітації безпроводового каналу з моделлю AWGN при $BER = 5 \cdot 10^{-4}$.

4) Гістограми розподілу значень PSNR як при імітації, так і при трансляції по реальній мережі в загальному випадку мають двогорбу форму. Один з максимумів характеризує значення PSNR відеопотоку за відсутності помилок (декодер здатний виправити бітові помилки при їх незначній кількості в кадрі). Другий максимум характеризує погіршення PSNR внаслідок великого числа спотворених відеокадрів в моменти завмирань (декодер нездатний виправити велику кількість бітових помилок) [18]. У міру збільшення числа помилок цей максимум зростає за рахунок зменшення другого. В процесі передачі, залежно від рівня помилок значення того чи іншого максимуму зростає. Якщо помилками в каналі зв'язку можна нехтувати розподіл PSNR має один максимум.

Емпіричні значення BER переходів від прийнятної якості до поганої, згідно з таблицею відповідності PSNR і MOS, представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Відповідність показників якості і BER

PSNR, дБ	MOS, %	Ймовірність BER	Якість за шкалою ITU	Погіршення зображення
Більше 37	81-100	Менш $1 \cdot 10^{-4}$	5 Чудове	Непомітно
31-37	61-80	$1 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4}$	4 Хороше	Помітно, але не дратує
25-31	41-60	$4 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-4}$	3 Задовільне	Злегка дратує
20-25 Менше 20	21-40	$8 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	2 Погане	Дратує
	0-20	Більше $1 \cdot 10^{-3}$	1 Дуже погане	Сильно дратує

Проте модель AWGN не здатна імітувати канал, схильний до завмирань. Як правило, помилки часто є довготривалими, оскільки висока вірогідність втрати бітів відбувається в специфічний період передачі, наприклад при поганому поширенні. Загасання передаваного сигналу призводить до пакетування (групуванню) помилок. Також причиною групування помилок можуть бути фізичні дефекти і збої в системі зберігання інформації. При використанні VLC виникнення бітових помилок призводить до виникнення пакету помилок або до групування.

3.3 Вплив пакетних помилок на візуальну якість потокового відео

З метою дослідження впливу помилок інформаційних пакетів на отриману якість було проведене імітаційне моделювання передачі 30-хвилинного відео (табл. 3.1) через безпроводову мережу з випадковими помилками пакетів в каналі.

Для проведення моделювання закодований відеопотік був розбитий на RTP/UDP-пакети за допомогою інструментів програмно-апаратного комплексу. Імітація пакетної помилки при передачі по безпроводовому каналу робилася шляхом видалення пакетів з файлу траси прийому. Це дозволило досліджувати і проаналізувати зміну візуальної якості при втраті пакетів. При цьому приймальний і неспотворений файл траси прийому був отриманий при передачі по "ідеальному" каналу з необмеженою смугою пропускання і відсутністю затримки за допомогою програмного середовища NS - 2 [19], а потім робилося випадкове видалення транспортних пакетів, згідно з параметрами PER і BEL. Оцінка якості робилася за допомогою показників PSNR і MOS, вичислених за допомогою інструментів програмно-апаратного комплексу.

На рис. 3.9 показаний вплив показника PER на якість потокового відео. Показані діапазони значень PER, у межах яких отримана якість була максимальною, ті. практично дорівнювало початковому, і мінімальним. Показано, що при $PER < 1 \cdot 10^{-4}$ помилка не впливає на отриману якість і може бути легко усунена декодерами і існуючими способами захисту від помилок. Подальша зміна якості носить

ступінчастий (послідовний) характер і зменшується при збільшенні PER.

Аналізуючи результати передачі потокового відео по імітованій безпроводовій із заданою вірогідністю пропажі пакетів мережі можна зробити наступні висновки:

1) При імітації безпроводового каналу число пакетних помилок $PER < 1 \cdot 10^{-4}$ не впливає на якість відеопотоку. При $PER < 1 \cdot 10^{-3}$ вплив помилок на якість непомітний і не чинить дратівливої дії при перегляді. При $PER > 0.1$ втрат пакетів в мережі роблять найгірший вплив на візуальну якість;

2) Можна гарантувати об'єктивну чудову якість відеопотоку при передачі по каналу з вірогідністю появи бітової помилки не більше $1 \cdot 10^{-4}$, хороша якість в діапазоні $1 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-1}$, задовільна якість в діапазоні від $4 \cdot 10^{-4} \dots 8 \cdot 10^{-4}$, погана якість в діапазоні $8 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ і дуже погане при більше $1 \cdot 10^{-1}$;

3) Гістограми розподілу значень PSNR при $PER < 6 \cdot 10^{-4}$ в загальному випадку мають двогорбу форму. Один з максимумів характеризує значення PSNR відеопотоку спотворених кадрів внаслідок втрати "своїх" пакетів. Другий максимум характеризує погіршення PSNR залежних кадрів (як правило, їх кількість більша). У міру збільшення числа помилок один з максимумів зростає за рахунок зменшення другого.

Емпіричні значення PER переходів від прийнятної якості до поганої, згідно з таблицею відповідності PSNR і MOS, представлені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Відповідність показників якості і PER

PSNR, дБ	MOS, %	Ймовірність PER	Якість за шкалою ITU	Погіршення зображення
Більше 37	81-100	Менш $1 \cdot 10^{-3}$	5 Чудове	Непомітно
31-37	61-80	$1 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$	4 Хороше	Помітно, але не дратує
25-31	41-60	$3 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$	3 Задовільне	Злегка дратує
20-25	21-40	$1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}$	2 Погане	Дратує
Менше 20	0-20	Більше $5 \cdot 10^{-2}$	1 Дуже погане	Сильно дратує

3.4 Вплив довжини групи помилок на якість потокового відео

Для вивчення впливу довжини групи помилок на отриману якість повторено імітаційне моделювання передачі 30-хвилинного відео (табл. 3.1) [20] через безпроводову мережу при значеннях PER від $1 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-2}$, оскільки в цьому діапазоні спостерігається візуальна зміна якості. Імітація групування пакетних помилок при передачі по безпроводовому каналу робилася шляхом випадкового видалення групи пакетів з файлу траси прийому із заданим значенням BEL. При цьому, наприклад, значення $BEL = 100$ означає, що загальне випадкове число підряд видалених пакетів за один раз не перевищує 100. Крім того, загальна кількість помилкових (видалених) пакетів у відеопослідовності в усіх експериментах при $PER = const$ зберігалася однаковим, незалежно від значення BEL. На рис. 3.10 показаний вплив показника BEL на якість потокового відео на прикладі $PER = 1 \cdot 10^{-3}$.

Аналізуючи результати передачі потокового відео по імітованій безпроводовій мережі із заданою величиною групування помилкових пакетів можна зробити наступні висновки:

1) При $PER < 1 \cdot 10^{-3}$ вплив поодиноких пакетних помилок на якість незначний і не чинить дратівливої дії при перегляді;

2) Гістограми розподілу значень PSNR мають двогорбу форму. Один з максимумів характеризує значення PSNR відеопотоку спотворених кадрів внаслідок втрати "своїх" пакетів. Другий максимум характеризує погіршення PSNR залежних кадрів (як правило, їх кількість більша). У міру збільшення значення BEL один з максимумів зменшується, оскільки число залежних кадрів також зменшується, тоді як другий максимум залишається незмінним. Це пояснюється тим, що при поодиноких розосереджених по усій відеопослідовності помилках число спотворених кадрів велике за рахунок поширення помилок на залежні кадри;

3) Збільшення довжини групування помилок веде до збільшення середньої якості відеопослідовності.

4) Вплив групи помилок на якість сильніший за рахунок локальної зосередженості помилок. Проте середня якість відеопослідовності при цьому збільшується у міру збільшення довжини групування при незмінному значенні вірогідності появи пакетних помилок;

5) При значенні $BEL > 60$ середня якість практично ідентично оригінальному відео.

Взаємозв'язок показників PER і BEL. Середня якість експериментальної відеопослідовності (табл. 3.1) при різних показниках PER і BEL показана на рис. 3.11.

Таким чином, показано, що при оцінці впливу помилкових пакетів на отриману якість необхідно аналізувати не лише вірогідність появи помилок, але також їх структуру і довжину групування. Крім того можна зробити наступні висновки:

1) Збільшення довжини групування помилок веде до збільшення середньої якості відеопослідовності. Це відбувається за рахунок погіршення якості невеликої ділянки відео, де зосереджена група помилок, тоді як при поодиноких помилках погіршення якості відео може спостерігатися в усій відеопослідовності;

2) При збільшенні довжини групи помилкових пакетів $BEL < 6$ зміна якості незначна і ідентично впливу поодиноких пакетних помилок ($BEL = 1$);

3) При $BEL > 60$ середня якість практично ідентично оригінальному ($PSNR < 90$ дБ). Логічно припустити, що значення BEL у довших відеопослідовностей при тому ж середньому значенні якості може мати більше значення.

4) Найбільша динаміка зміни $PSNR = 60$ дБ спостерігається в двох випадках: при фіксованому значенні $PER = 1 \cdot 10^{-3}$ і значеннях BEL, що змінюються; при $BEL > 80$ і значеннях PER, що змінюються. У інших випадках динаміка не істотна і мінімальна за відсутності групування помилок ($BEL = 1$).

5) Зі збільшенням PER вплив показника BEL на якість зменшується за рахунок збільшення "густини" поодиноких помилок.

Аналіз результатів показників PER і BEL, показує, що для оцінки впливу помилок передачі на отриману якість необхідно проаналізувати не лише вірогідність появи помилок, але також їх структуру і довжину групування. Найбільш ре-

алістичним і точним способом моделювання статистики помилок в каналі зв'язку є використання цієї вірогідності, отриманої з реальної мережі.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі досліджено важливе науково-технічне завдання впливу помилок в каналах широкосмугового безпроводового доступу на візуальну якість потокового відео.

При дослідженні поставлених завдань отримані результати, на підставі яких можна зробити наступні висновки:

1. Оцінка впливу бітових помилок, що виникають в реальних широкосмугових мережах безпроводового доступу при передачі потокового відео стандарту H.264/AVC за допомогою імітаційного моделювання показала, що при $BER \leq 3 \cdot 10^{-5}$ бітових помилок не впливають на якість відео, що приймається, і легко усуваються відомими, реалізованими у безпроводових мережах способами захисту від помилок. При $BER \geq 4 \cdot 10^{-3}$ втрати пакетів в мережі досягають максимального значення і призводять до неприйнятної якості відео, що приймається. Гарантувати об'єктивну чудову якість відеопотоку при передачі по каналу можна при значенні вірогідності бітової помилки не більше $1 \cdot 10^{-4}$, хороша якість в діапазоні $1 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-4}$, задовільна якість в діапазоні $4 \cdot 10^{-4} \dots 8 \cdot 10^{-4}$.

2. Оцінка впливу пакетних помилок що виникають в реальних широкосмугових мережах безпроводового доступу при передачі потокового відео стандарту H.264/AVC за допомогою імітаційного моделювання показала, що при $PER \leq 1 \cdot 10^{-4}$ пакетних помилки не впливають на якість відео, що приймається, і легко усуваються відомими, реалізованими в WiMax, способами захисту від помилок. При $PER \leq 1 \cdot 10^{-3}$ вплив помилок на якість непомітний і не чинить дратівливої дії при перегляді. При $PER \geq 0.1$ втрат пакетів в мережі приводять до неприйнятної якості відео, що приймається.

3. Рекомендовано враховувати не лише якість трансльованого і згодом декодованого відеопотоку, але і зміст відеоконтенту залежне як від параметрів кодека, так і статистики помилок в каналах безпроводового доступу. Показано, що різні сюжетні групи стандарту H.264/AVC по-різному впливають на сприйману якість при передачі по мережах. Так, в умовах передачі по мережі з малою вірогі-

дністю появи помилок ($BER=10^{-6}$, $BER=10^{-5}$) при мінімальному значенні бітрейта (128 кбіт/с) зберігається прийнятна якість відеопотоку, відповідне $MOS > 3$ для усіх типів сюжету. При цьому збільшення бітрейта більшою мірою позначається на якості відеопослідовностей ССГ, тоді як для відеозображень з елементами помітного виграшу, що рухаються, в якості не спостерігається. Присутність невеликих помилок ($BER=10^{-4}$) не впливає на якість декодування відеопослідовностей ССГ, але проявляється в МПСГ і яскраво виражено у ВДСГ.

4. Для оцінки якості відеопотоків стандарту H.264/AVC різних сюжетних груп в умовах порушення синхронізації доцільно використовувати розроблене ПЗ, за допомогою якого (при кількості втрачених кадрів не більше 1%) запропоновано використовувати метод "вставки" нульових значень, а в інших випадках - метод "склеювання", що дозволяє з найменшими похибками оцінити отриману якість відеопотоку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Беркман Л.Н., Толюпа С.В. Інфокомунікаційні мережі нового покоління. - К.: ДУІКТ, 2012. - 288 с.
2. Беркман Л.Н., Лапінський В.В. Основи інфокомунікацій: Навч. посібник. - К.: ДУІКТ, 2011. - 276 с.
3. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4-е изд. - СПб.: Питер, 2010. - 944 с.
4. Ebert J.-P. Willig A. A Gilbert-Elliot Bit Error Model and the Efficient Use in Packet Level Simulation // TKN Technical Reports, Berlin, March 2011.
5. Elliot E.O. "Estimates of error rates for codes on burst-noise channels," Bell Systems Technical Journal, vol. 42, pp. 2000 - 2012,
6. Fantacci R, Scardi M. Performance evaluation of preemptive polling schemes and ARQ techniques for indoor wireless networks. IEEE Transaction on Vehicular technology, 45(2):248-257, May 2010.
7. Feamster N., Balakrishnan H., Packet Loss Recovery for Streaming Video, 12th International Packet Video Workshop, Apr. 2002, July-September 2008, pp. 9-16.
8. Feng W.-C. Buffering Techniques for Delivery of Compressed Video in Video-on-Demand Systems. Kluwer Academic Publisher, 2011.
9. Ghandi M., Ghanbari M. Layered H.264 video transmission with hierarchical QAM, Electronic Systems Engineering Department, University of Essex.
10. Ghinea,G., Thomas, J. P. QoS impact on user perception and understanding of multimedia video clips//Proc. Of ACM Multimedia' Bristol. UK. 19 P. 49-54.
11. Gilbert E.N. "Capacity of a burst-noise channel," Bell Systems Technical Journal, vol. 39, pp. 1253-1265, Sep. 2012.
12. Goldsmith J., Chua S. G. Adaptive Coded Modulation for Fading Channels, IEEE Transactions on Communications, vol. 46, no. 5, pp. 595-602, May 1998.
13. Hanzo L., Cherriman P. J., Streit J. Wireless Video Communications. Digital & Mobile Communications. IEEE Press, 445 Hoes Lane, Piscataway, 2001.
14. He Z., Xiong H. Transmission distortion analysis for real-time video encoding

and streaming over wireless networks // IEEE transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 20 Vol. No. 9. Sept.

15. Hertrich D. MPEG4 video transmission in wireless LANs - basic QoS support on the data link layer of 802.11 b. Minor Thesis, 2002.

16. Hohlfeld O. Markovian Packet Loss Generators and Video QoE, T Systems, February 2008

17. <http://www.ixbt.com/divideo/estimatel.shtml>

18. <http://www.ixbt.com/divideo/codex-psnr.shtml>

19. <http://www.ict.ewi.tudelft.nl/vcdemo>

20. http://www.compression-links.info/Link/1417_VcDemo_Image_and_Video_

21. <http://www.trace.eas.asu.edu/tracemain.html>

22. <http://www.media.xiph.org/video/derf/>

23. <http://www.trace.eas.asu.edu>

24. <http://ftp3.itu.int/>

25. <http://www.virtualdub.org>

26. <http://www.dvd-hq.info/dvdjcompression.php>

27. <http://www.elecard.com/products/products-pc/professional/video-quest/>

28. <http://www.visumalchemia.com/vqstudio/Mownload>

29. <http://www.compression.ru>

30. http://www.its.blrdoc.gov/n3/video/VQM_software_description.php

31. <http://www.kanst.mediatory.ru/index.files/cce.htm>