

АНАЛІЗ ВПЛИВУ СПОТВОРЕНЬ В МОБІЛЬНОМУ КАНАЛІ НА ЯКІСТЬ  
ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ЗІ СТИСНЕННЯМ MPEGАНАЛІЗ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЙ В МОБІЛЬНОМ КАНАЛЕ  
НА КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ С СЖАТИЕМ MPEGIMPACT ANALYSIS OF MOBILE CHANNEL IMPAIRMENTS  
ON SYSTEM PERFORMANCE WITH MPEG COMPRESSION

**Анотація.** У статті представлено результати досліджень в напрямку визначення впливу спотворень при мобільному прийманні відеосигналів у форматі MPEG та аналізу ефективності методів об'єктивної оцінки якості при використанні їх під час передбачення спотворень.

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований в направлении определения влияния искажений при мобильном приеме видеосигналов в формате MPEG и анализа эффективности методов объективной оценки качества при использовании для предсказания искажений.

**Abstract.** In article the results of studies on impairment impact during mobile reception of MPEG video signals and efficiency analysis of objective quality estimation methods for impairment prediction are presented.

У світі широко впроваджують технології ширококутвого доступу. При цьому серед вимог до таких технологій є не тільки забезпечення доступу до мережі Інтернет, але й можливість передавання сигналів телебачення через IP-протокол (IPTV) та інших мультимедійних послуг в межах концепції Triple Play. Крім того, основною тенденцією є необхідність в отриманні таких послуг у будь-якому місці і в будь-який час, а це передбачає забезпечення мобільного доступу. Безумовно, в разі обмеження мобільності абонента до переміщення в межах оселі можуть бути використані «заплаточні» технології, такі як Wi-Fi чи будь-які інші. У випадку відсутності цього обмеження більш ефективним буде використання технологій мобільного зв'язку чи таких технологій, як IEEE 802.16. Однією з проблем на сьогодні є моніторинг якості функціонування мереж у цьому стандарті при передаванні аудіовізуальної інформації.

До цього часу в напрямку систем у стандарті IEEE 802.16 проведена низка досліджень. Серед основних робіт в цьому напрямку можливо відзначити роботи [1...3]. Ці роботи присвячено питанням моделювання та аналізу системи у стандарті IEEE 802.16. Однак у них не приділено уваги аналізу характеристик на каналному рівні та в основному розглянуто адаптивні режими модуляції та кодування. Результати моделювання для неадаптивних режимів роботи з впливом різних факторів відсутні, а питанням передавання аудіовізуальної інформації взагалі не приділено уваги. **Метою цієї статті** є аналіз особливостей використання мереж IEEE 802.16 для надання послуг IPTV в умовах мобільності абонента в частині оцінки спотворень, що виникають при передаванні відеосигналів через мобільний безпроводовий канал.

Перш за все, є важливим визначити характеристики систем ширококутвого доступу у стандарті IEEE 802.16 на фізичному та каналному рівнях, що мають бути враховані під час доставляння аудіовізуальної інформації. Стандарт IEEE 802.16 включає декілька варіантів системи IEEE 802.16 для фіксованого та мобільного доступу, для яких призначено певне позначення [4...6]. Результати порівняльного аналізу технічних параметрів варіантів системи IEEE 802.16 на рівнях моделі взаємодії відкритих систем (OSI) наведено в табл. 1. З табл. 1 видно, що принципи побудови системи IEEE 802.16 у варіантах для мобільного та фіксованого доступу на фізичному рівні є значною мірою корельовані між собою та відрізняються здебільшого на рівнях моделі OSI, що розташовані вище, та в інших технічних рішеннях, що забезпечують мобільність абонента.

Передавання через безпроводовий канал сигналів таких критичних до якості обслуговування служб, як служби IPTV, передбачає виконання низки вимог, зокрема забезпечення необхідної пропускної здатності каналу, мінімізація вірогідності виникнення спотворень, типових до мереж з пакетним передаванням даних тощо [7]. Це викликано тим, що системи IPTV зазвичай реалізують без можливості повторного надсилання пошкодженого фрагмента потоку та основною особливістю є значна чутливість до кількості помилок в каналі, причинами виникнення яких може бути низка факторів.

Таблиця 1 - Характеристики фізичного рівня та каналного стандартів серії IEEE 802.16

Параметр	Стандарти IEEE 802.16				
	802.16	802.16a	802.16d	802.16e	802.16m
Рік розроблення	2001	2003	2004	2005	2011
Частотний діапазон	10-66 ГГц	2-11 ГГц	2-11 ГГц	2-6 ГГц	2-6 ГГц
Умови приймання	в межах прямої видимості	поза прямою видимістю (NLOS)			
Режим приймання	стаціонарний	стаціонарний	стаціонарний	мобільний	мобільний
Рандомізація	Генератор псевдовипадкової двійкової послідовності (PRBS) з породжуючим поліномом $x^{15}+x^{14}+1$				
Зовнішнє каналне кодування	Код Ріда-Соломона RS (255,239,8) зі змінною довжиною кодового слова з виправленням від 1 до 16 помилок				-
Внутрішнє каналне кодування	Блоковий код (24,16)/ код перевірки парності	TSM 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8; блоковий або згортковий турбокод	CC 1/2, 2/3, 3/4, 5/6	Блоковий турбокод	Згортковий турбокод
Перемежування	Бітове з параметрами, що відноситься до певного режиму				Бітовий
Метод цифрової модуляції	ФМ-2, ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64	ФМ-2, ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256	ФМ-2, ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64	ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64	ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64
Формування основної смуги	Фільтр Найквіста $\alpha = 0,25$	Фільтр Найквіста $\alpha = 0,15; 0,18; 0,25$	-	-	-
Синхронізація/ оцінка каналу	Преамбула/ еквалайзер	Преамбула/ пілот-сигнали			
Режим передавання	SC	SCa	OFDM	OFDMA	OFDMA
Режим OFDM	-		256	128, 512, 1024, 2048	512, 1024, 2048
Захисний інтервал			1/4, 1/8, 1/16, 1/32		1/4, 1/8, 1/16
Ширина частот каналу, МГц	20; 25; 28			1,75-20	5-20
Швидкість цифрового потоку, Мбіт/с	32-134		1-75	1-128	1 Гбіт/с (MIMO)

Тому важливим є визначення припустимих значень параметрів, що характеризують якість функціонування системи IEEE 802.16 на фізичному та каналному рівнях. Серед таких параметрів можливо виділити коефіцієнт помилок бітів (BER), коефіцієнт помилок пакетів (PER) та коефіцієнт втрати пакетів (PLR), що фактично характеризують вірогідність виникнення помилкової події на різних рівнях каналної структури.

Для оцінки припустимих значень BER, PER та PLR будемо використовувати модель, що її побудовано в пакеті візуального моделювання Simulink, що дозволяє з достатньою точністю та достатньою гнучкістю визначити всі необхідні параметри.

Враховуючи те, що під час передавання сигналів IPTV звичайно висхідний канал використовують для надсилання запитів на надання доступу до необхідного контенту, дослідження будемо проводити для низхідного каналу за різних конфігурацій IEEE 802.16 та в різних типах каналів. Під час моделювання аналізувалась конфігурація системи IEEE 802.16 з каскадним

включенням двох каналних кодерів (кодера Ріда-Соломона і згорткового кодера зі швидкостями коду 1/2, 2/3 та 3/4) та методами цифрової модуляції ФМ-4/ КАМ-16/ КАМ-64. Розглядалось два варіанти приймання:

- випадок 1: абонент є нерухомим та в каналі діє тільки адитивний білий гаусів шум (АБГШ);
- випадок 2: абонент системи IPTV є мобільним і швидкість переміщення транспортного засобу з абонентом дорівнює приблизно 50 км/г. При цьому в каналі внаслідок багатопроменевого спотворення виникали частотно-селективні завмирання та ефект Доплера.

Моделювання проводилось за різних значень відношення сигнал/шум (SNR) в каналі з АБГШ та за сумісного впливу частотно-селективних завмирань з доплерівським зсувом частоти та АБГШ. За результатами моделювання побудовано графічні залежності, що їх надано на рис. 1...4. Ці залежності буде використано нижче для визначення припустимих значень досліджуваних параметрів (BER, PER, PLR) при передаванні сигналів MPEG через канал системи безпроводового доступу у стандарті IEEE 802.16.

Визначимо основні характеристики, за якими будемо оцінювати спотворення відеосигналів при передаванні через безпроводовий канал системи IEEE 802.16, та підходи до таких оцінок. При оцінці спотворень, що виникають в каналі зв'язку, може бути використаний один із двох підходів - об'єктивна або суб'єктивна оцінка якості зображення. Вибір переважного методу оцінки здійснюється залежно від сфери застосування - оцінка при стисненні і декодуванні аудіовізуальної інформації, оцінка при додатковому відеообробленні (наприклад, при зміні роздільної здатності зображення або формату кадру) й оцінка в ході технічної експлуатації цифрових систем розподілу аудіовізуальної інформації. В процесі вибору переважного методу оцінки якості аудіовізуальної інформації також мають бути враховані особливості впливу спотворень/завад на передаваний сигнал і його структуру.

Суб'єктивна оцінка, як би вона не виконувалася - відповідно до вимог або неформально, - вимагає багато часу, ресурсів і засобів. Причому навіть в кращих умовах вона не завжди дає подібні результати. З одного боку, око експерта може помітити дефекти, невидимі середньому глядачу. З іншого боку, експерти можуть втомитися і пропустити суттєві спотворення [8].

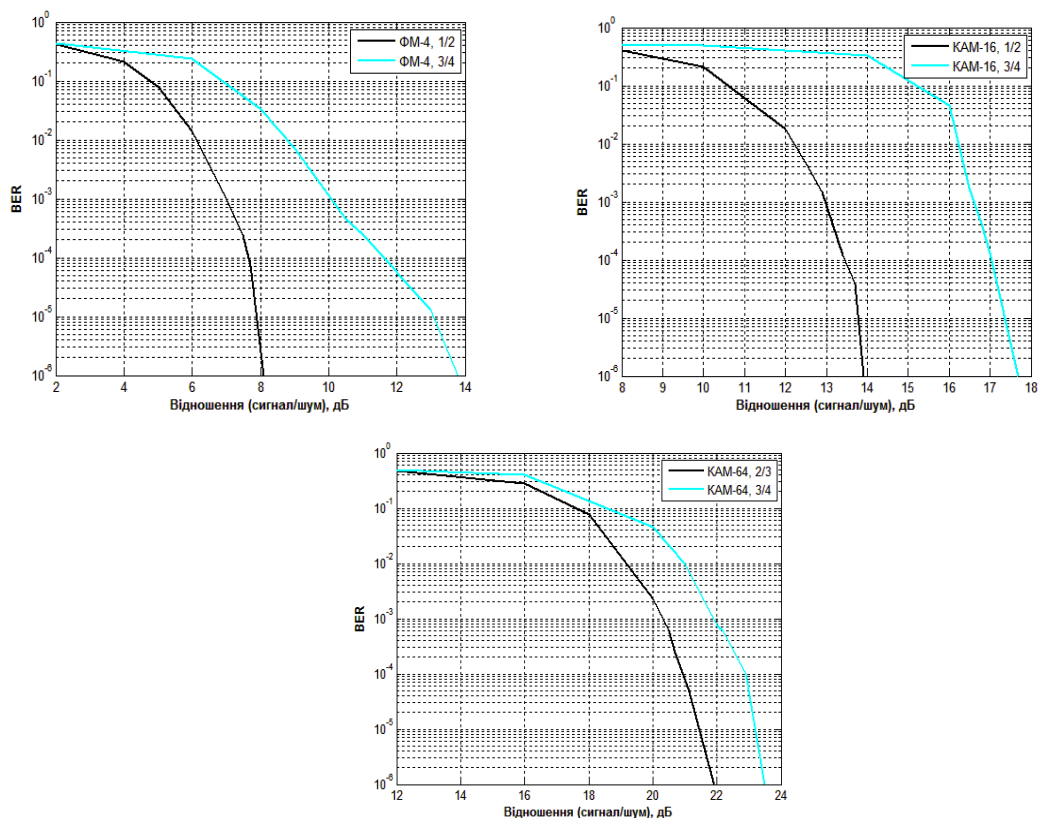


Рисунок 1 – Залежність BER від відношення SNR (випадок 1), отримані в процесі математичного моделювання

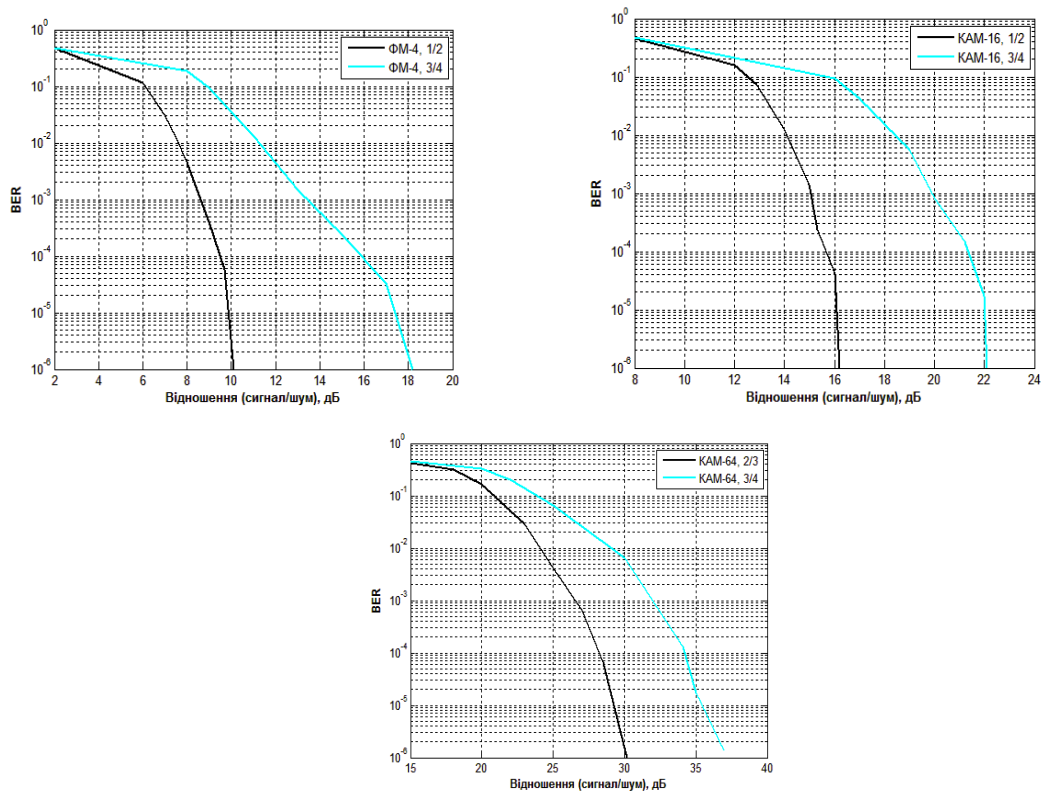


Рисунок 2 – Залежність BER від відношення SNR (випадок 2), отримані в процесі математичного моделювання

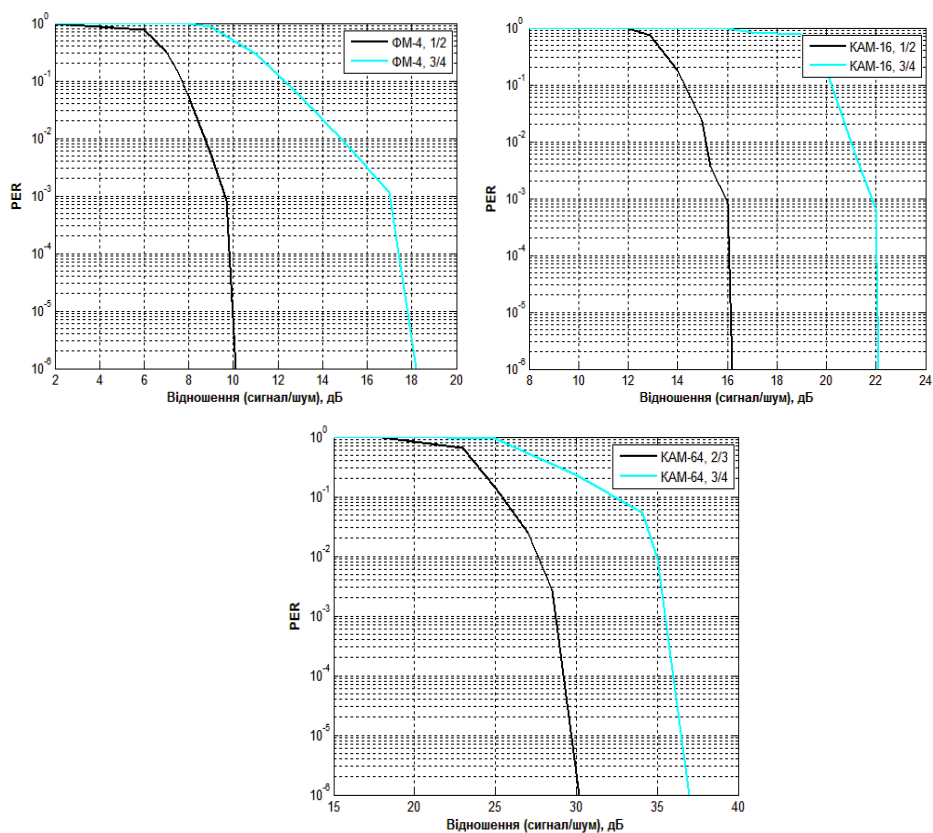


Рисунок 3 – Залежність PER від відношення SNR (випадок 2), отримані в процесі математичного моделювання

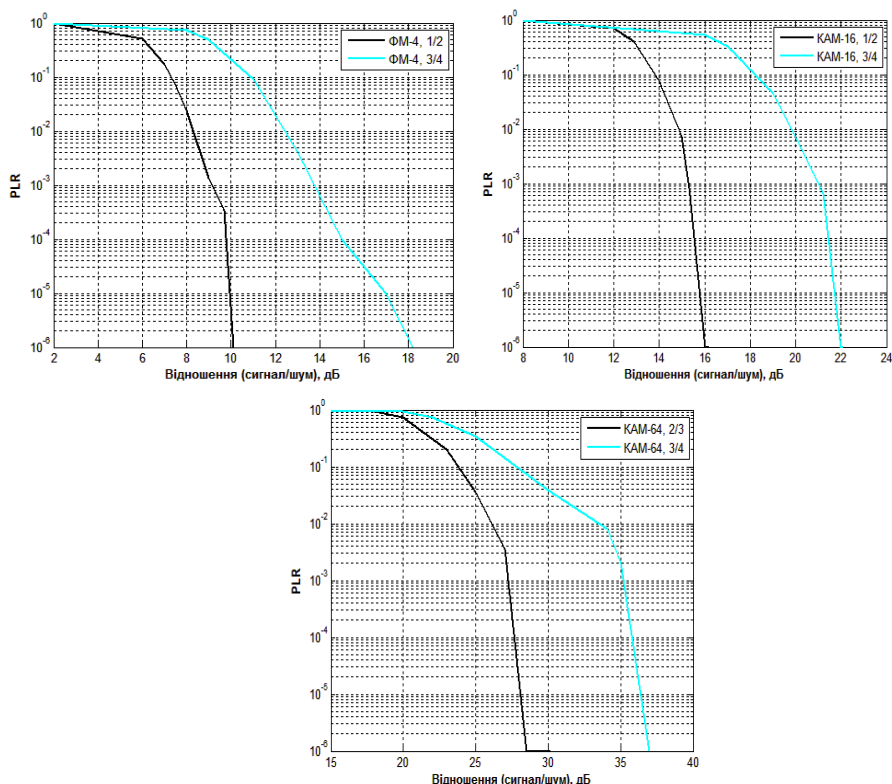


Рисунок 4 – Залежність PLR від відношення SNR (випадок 2), отримані в процесі математичного моделювання

Крім того, в цифрових системах передавання аудіовізуальної інформації виникає пороговий ефект, за якого зображення повністю чи частково руйнується, що також, звичайно, призводить до подібного ефекту й у суб'єктивній оцінці якості – оцінки суттєво погіршуються [8].

Пороговий ефект виникає в цифрових системах з огляду на те, що інформація про зображення, також як і інформація про службову інформацію, використовувану для декодування зображення, передаються в закодованій формі. Тому при виникненні значної кількості помилок зростає вірогідність пошкодження передаваного потоку і неможливості їх декодувати.

На відеозображенні в найзагальнішому випадку це проявляється виникненням помилкових блоків, макроблоків або зрізів, що є складовими частинами передаваного зображення при кодуванні MPEG (рис. 5). Такі спотворення відносять до структурних спотворень. Їх виникнення вважається неприпустимим та сам факт їх появи говорить про порушення у функціонуванні системи в цілому або окремих ланок наскрізного тракту.



а) Оригінальне зображення

б) Пошкоджене зображення

Рисунок 5 – Прояв порогового ефекту на відеозображенні:

а) неспотворене зображення; б) пошкоджене зображення

У зв'язку з цим, використання суб'єктивної оцінки якості при оцінці спотворень, що виникають при розподілі сигналів аудіовізуальних служб, по-перше, буде занадто складною процедурою - пороговий ефект може бути відсутнім на досить тривалому інтервалі часу і виникатиме випадковим чином з причини непередбачених обставин – припустимо через виникнення несправності або погіршенні умов приймання. Якщо навмисно погіршувати умови приймання пороговий ефект

проявлятиметься так, як це показано на рис. 5, і при цьому суб'єктивна оцінка найімовірніше буде негативною. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що оцінку якості зображення з використанням суб'єктивної оцінки в цьому випадку застосовувати представляється недоцільним.

У результаті цього все частіше звертаються до використання приладів, що дозволяють вимірювати якість зображення об'єктивними методами з повним еталоном (Full - Reference), з обмеженим еталоном (Reduced Reference) і без еталону (No Reference) [8].

Існує багато метрик, що можуть бути використані у системах оцінки якості з повним еталоном. У процесі дослідження ефективності цих метрик для моніторингу якості функціонування з'ясовано, що найбільш відповідною метрикою, яка може бути використана для об'єктивної оцінки якості зображення, є оцінка структурної подібності SSIM (Structural SIMilarity, структурна подібність).

Ступінь структурної подібності оцінюють таким чином [9]:

$$SSIM = \left( \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \right) \left( \frac{2\bar{X}\bar{Y}}{(\bar{X})^2 + (\bar{Y})^2} \right) \left( \frac{2\sigma_X \sigma_Y}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} \right), \quad (1)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}, \quad \bar{Y} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_{ij} \quad (2)$$

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{X})^2 \quad (3)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y_{ij} - \bar{Y})^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{XY} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{X})(y_{ij} - \bar{Y}) \quad (5)$$

де SSIM – значення ступеня подібності зображень;  $X = \{x_{ij}\}$  і  $Y = \{y_{ij}\}$  – порівнювані зображення;  $M, N$  – розміри зображення.

Перша складова виразу (1) є коефіцієнт кореляції між зображеннями  $X$  та  $Y$ . Друга складова характеризує подібність середніх значень яскравості двох порівнювальних зображень. Третя складова характеризує подібність контрастів двох порівнювальних зображень.

Проведено моделювання передавання відеосигналу зі стандартною чіткістю через безпроводовий канал системи IEEE 802.16. Для оцінки спотворень, що виникають в каналі передавання, скористувалися метрикою SSIM, усередненою по усіх кадрах відеозображення, й оцінили ймовірність втрати відеокадру і ступеня спотворень передаваного зображення при різних характеристиках безпроводового каналу.

Узагальнена структурна схема лабораторної установки, використаної для проведення дослідження, наведена на рис. 6. При проведенні моделювання здійснювалось зчитування відеопослідовності у форматі потоку MPEG у середовище Matlab, звідки вона безпосередньо передавалась в модель системи IEEE 802.16. У процесі подальшого оброблення проводилась фрагментація потоку MPEG з уведенням в протокольні блоки даних рівня керування доступу до середовища передавання (MAC-рівень) системи IEEE 802.16 з фіксованою довжиною 280 байт. Додатково для забезпечення ідентифікації інформації і можливості відновлення потоку MPEG з протокольних блоків даних вводиться заголовок довжиною 6 байт.

Після проведення операції інкапсуляції потоку MPEG в протокольні блоки даних MAC-рівня системи IEEE 802.16 здійснювалось оброблення передаваного потоку на фізичному рівні. Для моделювання обрано канал з АБГШ, тому як характер помилок, що виникають при передаванні відеозображення, практично не залежить від типу каналу та може бути виражено за допомогою параметрів BER, PER та PLR. Передавання відеопослідовності повторювалося п'ять разів за різних відношень сигнал/шум в каналі.

При аналізі спотворень відновлений потік MPEG подавався на відеодекодер і блоки аналізу відеозображення. Для розрахунку значення коефіцієнта структурної подібності в Matlab використано програму, реалізовану за формулами (1)..(4). Розраховувалось середнє значення SSIM для кожного кадру відеопослідовності для сигналу яскравості. За результатами проведення аналізу отримані залежності вірогідності втрати відеокадру (VFLR, Video Frame Loss Rate) від величини коефіцієнта втрати пакетів, а також залежність усередненої величини коефіцієнта SSIM (A-SSIM, Average-SSIM) від величини BER.

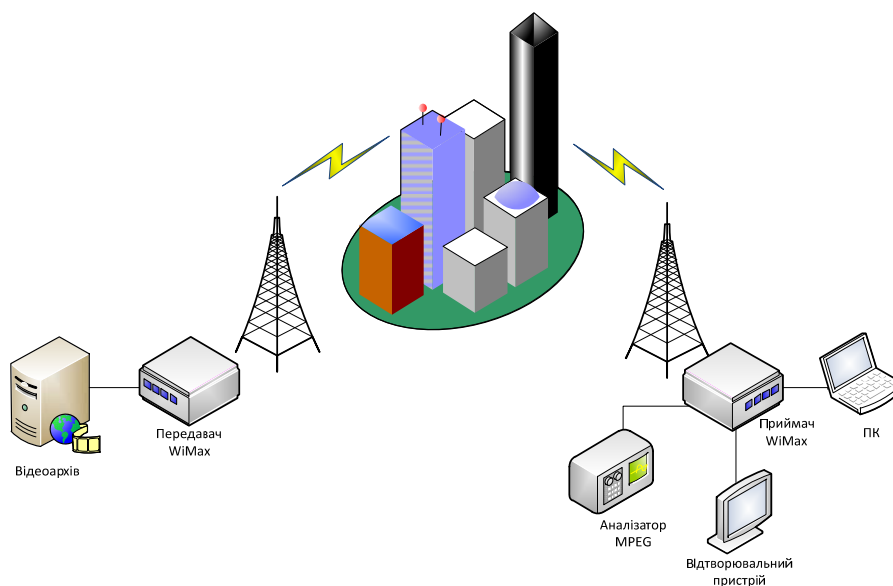


Рисунок 6 – Узагальнена структурна схема лабораторної установки

Експериментальні значення, отримані в процесі комп’ютерного моделювання, наведено в на рис. 7...9. При підвищенні відсотка втрачених пакетів величина коефіцієнта A-SSIM знижувалася, це викликано тим, що при підвищенні кількості помилкових блоків кореляція між початковим і прийнятим відеозображеннями (що характеризується параметром A-SSIM) знижувалася. Проте за досить великого відсотка втрати пакетів ця величина асимптотично наближалася до величини 0.1, а не до нуля, це викликано тим, що все-таки вдавалося вірно декодувати окремі блоки/макроблоки. При перевищенні коефіцієнта BER порогової величини на зображенні починає проявлятися блоковий ефект. Причому величина помилкових блоків зростала в міру зростання коефіцієнта BER, це пов’язано з тим, що при цьому зростає вірогідність пошкодження заголовка окремих кадрів, а також службової інформації нижчих рівнів ієрархії, що, у свою чергу, призводить до підвищення вірогідності невірної їх декодування або навіть іноді просто до неможливості декодування.

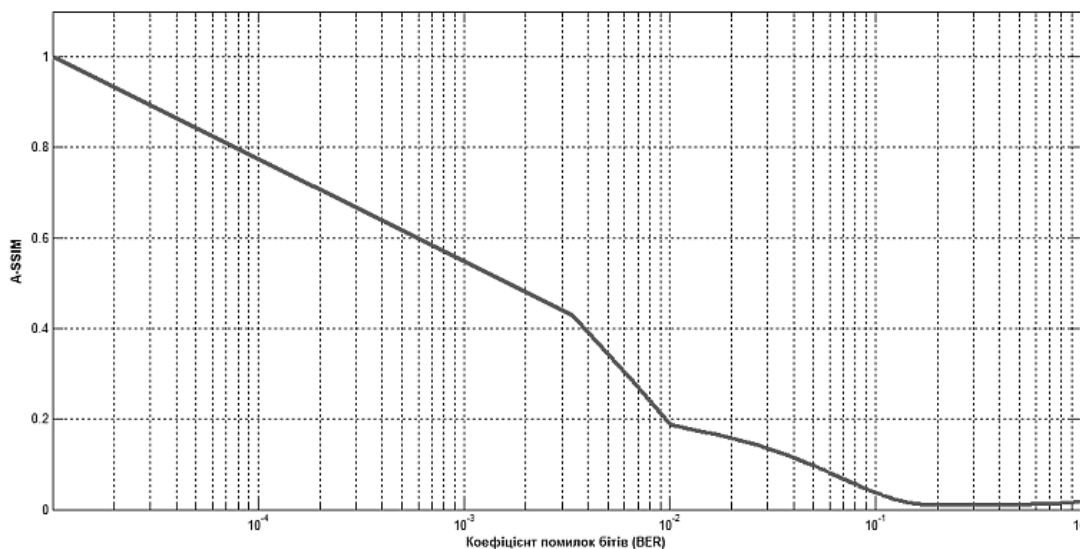


Рисунок 7 - Залежність середнього значення коефіцієнта структурної подібності від коефіцієнта помилкових біт

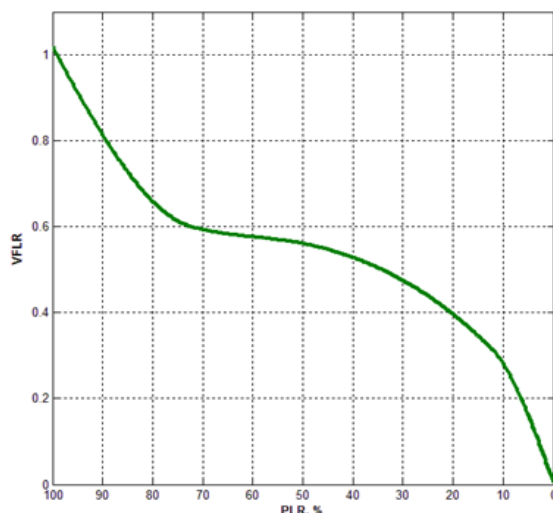


Рисунок 8 – Залежність вірогідності втрати відеокадру від PLR

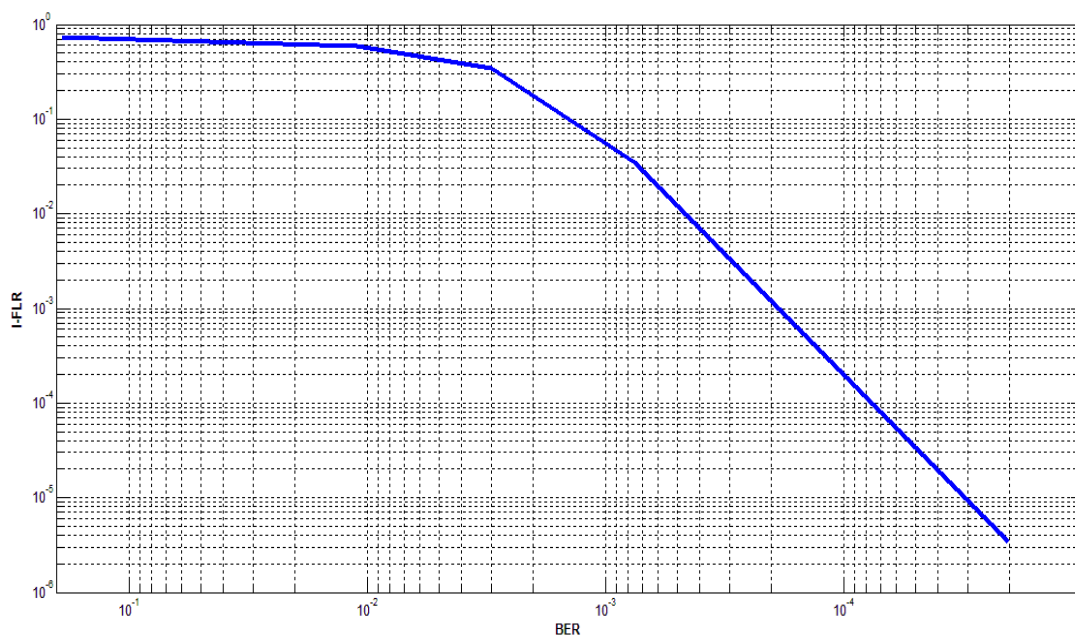


Рисунок 9 – Залежність вірогідності втрати кадрів типу *I* від величини BER

Так, наприклад, при аналізі відеопослідовності після передавання через канал системи IEEE 802.16 при вірогідності втрати пакета PLR = 72 % і PLR = 99 % було з'ясовано, що за таких умов приймання зображення виявилось практично недекодованим через пошкодження більшості опорних *I*-кадрів потоку MPEG, за яким робиться декодування передбачених *P*- і *B*-кадрів. Усе це призводить до неможливості декодування *P*- і *B*-кадрів, які обчислюються на основі недекодованих *I*-кадрів. На відеозображенні це позначалося так, як показано на рис. 10.

На закінчення слід зазначити наступне. Технологія IEEE 802.16 є перспективною системою безпроводового доступу, призначеною для забезпечення доступу до різноманітних інтерактивних служб, таких як доступ до Інтернет, IP-телефонія, відео за запитом, потокове відео, телеконференція тощо. Ця система є вдалим технічним рішенням для реалізації мереж з рухомих та фіксованим доступом завдяки своїй універсальності та технічним показникам.





Рисунок 10 – Кадри відеопослідовності на виході відеодекодера MPEG :  
 SSIM = 0,99, PLR = 0,003 % (а); SSIM = 0,57, PLR = 0,4 % (б);  
 SSIM = 0,44, PLR = 12 % (в); SSIM = 0,18, PLR = 47 % (г)

При впровадженні нових служб, сигнали яких передають через мережу IEEE 802.16, слід враховувати певні специфічні вимоги, виконання яких дозволить забезпечувати необхідний рівень якості обслуговування. Однією з таких служб є служба передавання відеоінформації, базована на використанні IP-протоколу, що є досить критичною до якості обслуговування. В разі недотримання вимог щодо якості обслуговування приймання сигналів такої служби становиться неможливим або частково обмеженим. Саме тому є важливим аналіз особливостей використання мереж IEEE 802.16 для надання послуг IPTV в умовах мобільності абонента в частині оцінки спотворень, що й було метою цієї статті. Для досягнення цієї мети побудовано математичну модель системи безпроводового зв'язку у стандарті IEEE 802.16 з можливістю передавання аудіовізуальної інформації, оцінено параметри PER, BER та PLR, що характеризують якість функціонування системи IEEE 802.16 за різних умов приймання. Проаналізовано основні спотворення, які виникають у відеосигналі при передаванні через безпроводовий канал зв'язку. Крім того, запропоновано використання метрики об'єктивної оцінки якості SSIM, що до цього моменту використовували для аналізу спотворень після стиснення, для оцінки спотворень у процесі технічної експлуатації та моніторингу трактів системи IEEE 802.16 при передаванні сигналів аудіовізуальних служб.

### Література

1. Simulation of IEEE 802.16j Mobile WiMAX Relay Network to Determine the Most Efficient Zone to Deploy Relay Station/ V. Bulbenkiene, V. Pareigis, A. Andziulis// Electronics and Electrical Engineering. – 2011. - № 6 (112). – С. 81-84.
2. Дроздова В.Г. Имитационное моделирование характеристик MAC-протокола WiMAX с учетом реальных условий: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.15

- „Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети” / В. Г. Дроздова. – Новосибирськ, 2011. - 18 с.
3. Amalia Roca Implementation of a WiMAX simulator in Simulink: thesis of diploma/ Amalia Roca// Engineering & technical university Spain. – 2007. – 127 p.
  4. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems: IEEE standard 802.16d (Revision of IEEE 802.16-2001): 2004. – NY: IEEE-SA Standards Board, 2004. – 895 p. – (International Standard).
  5. Broadband Radio Access Networks (BRAN); HiperMAN; Physical (PHY) layer: ETSI TS 102 177:2010. – F: ETSI Technical Committee Broadband Radio Access Networks, 2010. – 53 p. – (European standard).
  6. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands: IEEE standard 802.16e: 2004. - NY: IEEE-SA Standards Board, 2004. – 376 p. - (International Standard).
  7. Локшин Б.А. Цифровое вещание: от студии к телезрителю/ Локшин Б.А. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМ, 2001. – 448 с.
  8. Хоффман Г. Моделирование человеческого зрения для объективной оценки качества изображения/ Г. Хоффман // Mediavision. – 2010. - № 7. – С. 43-47.
  9. Zhou Wang Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity/ Zhou Wang// IEEE transactions on image processing. – 2004. - № 4(13). - С. 1-14.