

Національний університет “Львівська політехніка”

*На правах рукопису*

**Хайдер Худхаір Аббас Аль-Заяді**

УДК 621.396

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ ДЛЯ  
АБОНЕНТІВ МЕРЕЖ 4G НА ОСНОВІ МОДЕЛІ  
СЕРВІСНОЇ АРХІТЕКТУРИ LTE**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник -  
доктор технічних наук,  
професор **Климаш М.М.**

*Ідентичність всіх примірників дисертації*

**ЗАСВІДЧУЮ:**

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради*

**/І.В. Демидов/**

Львів – 2016

## ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В LTE МЕРЕЖАХ.....	18
1.1 Основні завдання із забезпечення QoS у безпроводних мережах широкосмугового доступу .....	18
1.2. Класифікація та характеристики якості обслуговування в LTE .....	21
1.3. Керування параметрами радіоінтерфейсу .....	23
1.4 Аналіз методів забезпечення параметрів QoS в сервісно-орієнтованій архітектурі LTE .....	26
1.4.1. Основні функції мережі LTE, що належать до керування якістю обслуговування в площині користувача .....	28
1.4.2. Основні функції мережі LTE, що належать до керування якістю обслуговування в площині керування.....	30
1.5. Особливості надання послуг у мережах LTE.....	30
1.6 Зв'язок між поняттям QoS та QoE .....	35
1.7. Управління параметрами QoE та QoS .....	37
Висновки до першого розділу .....	40
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ, ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LTE .....	41
2.1. Підвищення пропускної здатності з використанням CQI .....	41
2.1.1. Співвідношення між значеннями пропускної здатності каналу і індикатором якості каналу .....	43

2.2. Модель каналу за умови невисокої швидкості переміщення абонента (ITU Pedestrian).....	48
2.3. Дослідження впливу підстроювання параметрів каналу LTE на відносну частоту бітової помилки .....	54
2.3.1. Моделювання адаптивного підстроювання параметрів каналу .....	54
2.3.2. Мінімізація міжсимвольної інтерференції Zero Forcing .....	57
2.3.3. Компенсація на основі мінімізації середньоквадратичної помилки .....	59
2.4. Дослідження впливу пропускної здатності мережі LTE на показники QoE та QoS.....	60
2.4.1. Підходи до оцінки якості надання послуг .....	62
2.5 E-модель для оцінки якості сприйняття послуги .....	63
2.6. Алгоритми діаграмоутворення і просторового рознесення .....	65
2.6.1. Ефективна ширина діаграми спрямованості антени базової станції LTE.....	68
Висновки до другого розділу.....	72
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ У СИСТЕМІ LTE.....</b>	<b>74</b>
3.1. Особливості та параметри технології LTE-MIMO .....	74
3.2. Алгоритми формування пропускної здатності LTE на фізичному рівні .....	75
3.2.1. Формування пропускної здатності на основі вибору порту антени і кількості OFDM символів для різної смуги каналів «вгору» і «вниз» .....	78
3.3. Підвищення пропускної здатності на основі узгодженого планування міжрівневої взаємодії в системі LTE з урахуванням QoS .....	80
3.3.1. Оцінка стану безпроводного каналу з використанням моделі ланцюга Маркова із скінченною кількістю станів.....	81
3.3.2. Співвідношення між C/Ш та показником CQI.....	83

3.3.3. Модель прогнозування CQI.....	83
3.4. Удосконалення моделі розподілу ресурсів радіоканалу LTE за рахунок введення коефіцієнта справедливості розподілу ресурсів .....	85
3.4.1. Аналіз недоліку методу розподілу ресурсів на основі максимуму відношення C/I.....	86
3.4.2. Особливості обміну керуючою інформацією в технології LTE для надання ресурсів абонентським терміналам .....	87
3.4.3. Методика надання ресурсних блоків для максимізації пропускної здатності .....	89
3.4.4. Удосконалений метод розподілу ресурсів радіоканалу LTE першого типу за рахунок формування віконного механізму групування абонентів за значенням співвідношення сигнал/шум.....	94
3.5. Модель групової багат шарової відеотрансляції у мережі LTE.....	97
Висновки до третього розділу .....	100
<b>РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ LTE ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ .....</b>	<b>101</b>
4.1 Застосування засобів підвищення пропускної здатності та якості обслуговування на фізичному рівні LTE.....	101
4.1.1. Дослідження пропускної здатності каналу LTE за різних конфігурацій приймально-передавального тракту .....	101
4.1.2. Дослідження впливу компенсації інтерференції та підвищення пропускної здатності безпроводного каналу LTE .....	104
4.1.3. Дослідження впливу вибору кількості портів антенної системи та кількості симовлів на пропускну здатність каналу LTE .....	107
4.2. Моделювання та дослідження розподілу ресурсів за удосконаленою моделлю нульового типу.....	109

4.3. Моделювання та дослідження розподілу ресурсів за удосконаленою моделлю першого типу.....	116
4.4. Дослідження параметрів QoE та QoS у комірці LTE у процесі передавання мультимедійного трафіку .....	118
4.4.1. Підвищення якості сприйняття трафіку VOIP .....	118
4.4.2. Дослідження параметрів QoE у процесі відеотрансляції.....	120
Висновки до четвертого розділу .....	125
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....	127
ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи. ....	130
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	133

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project	Проект партнерства 3-го покоління
4G	4 <sup>rd</sup> Generation	Четверте покоління
A/CCF	Admission Capability Control Function	Функція управління доступом
AM	Acknowledged Mode	Режим із підтвердженням
AMC	Adaptive Modulation And Coding	Адаптивна модуляція і кодування
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Асинхронний режим перенесення даних
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Адитивний білий Гаусівський шум
BE	Best Effort	Найкраще з можливого
BER	Bit Error Rate	Імовірність помилки біта
BF	Beamforming	Формування діаграми спрямованості
BLER	Block Error Rate	Імовірність помилки блоку
BPSK	Binary Phase Shift Key	Бінарна фазова маніпуляція
BS	Base Station	Базова станція
BSA	Base Station Antenna	Антенна базової станції
CDMA	Code Division Multiple Access	Множинний доступ з кодовим розділенням каналів
CF	Classification Function	Функція класифікації
CID	Connection Identifier	Ідентифікатор з'єднання
CN	Core Network	Базова мережа
COS	Class Of Service	Клас сервісу
CP	Cyclic Prefix	Циклічний префікс
CPS	Common Part Sublayer	Субшар спільної частини
CQI	Channel Quality Indicator	Ідентифікатор якості каналу
CS	Convergence Sublayer	Субшар конвергенції
DCCH	Dedicate Control Channel	Призначений канал управління
DCI	Downlink Control Information	Керуюча інформації низхідного каналу
DM-PUCCH	Demodulation Physical Uplink Control Channel	Фізичний висхідний канал управління для демодуляції
DOD	Direction Of Departure	Кут приходу
DRBs	Data Radio Bearers	Радіопослуги передачі даних

DSCP	Differentiated Services Code Point	Код диференційованої послуги
DTCH	Dedicated Traffic Channel	Призначений канал трафіку
DWTS	Downlink Pilot Time Slot	Пілотний часовий інтервал низхідного каналу
EPS	Evolved Packet Switched	Еволюційна пакетна комутація
ERTPS	Extended Real Time Polling Service	Розширена функція голосування реального часу
ESQOS	End To End Service Quality Of Service	Наскрізна якість обслуговування
EUE	End User Equipment	Кінцевий термінал користувача
FDD	Frequency Division Duplex	Дуплекс з частотним розділенням
FFT	Forward Fourier Transfer	Пряме перетворення Фур'є
FSMC	Finite State Markov Chain	Марківський ланцюг із скінченною кількістю станів
FSTD	Frequency Switched Transmit Diversity	Рознесення передачі у частотному домені
GBR	Guaranteed Bit Rate	Гарантована швидкість передавання
GOB	Good Or Better	Сервіс «Добре або краще»
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request	Гібридний автоматичний запит повторного передавання
HS-DPA	High Speed Downlink Packet Access	Високошвидкісний пакетний доступ по низхідному каналу
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform	Зворотнє дискретне перетворення Фур'є
IEEE	Institute Of Electrical And Electronics Engineers	Інститут інженерів-електриків та електроніків
ISI	Inter-Symbol Interference	Міжсимвольна інтерференція
ITU	International Telecommunication Union	Міжнародний союз електрозв'язку
KPI	Key Performance Indicator	Ключовий показник ефективності
LTE	Long Term Evolution	Довгострокова еволюція
MAC	Media Access Control	Контроль доступу до середовища
MC	Modulation and Coding	Модуляція і кодування
MCS	Modulation and Coding Schema	Сигнально-кодова конструкція
MF	Mapping Function	Функція відображення
MIMO	Multi Input Multi Output	Багатоантенна система
MME	Mobility Management Entity	Вузол управління мобільністю

MMSE	Minimum Mean Square Error	Мінімізація середньоквадратичної помилки
MOS	Mean Opinion Score	Усереднена суб'єктивна оцінка якості сприйняття
MRC	Maximal Ratio Combining	Сумування диференційно-зважених складових
MRTR	Minimum Reserved Traffic Rate	Мінімальна зарезервована швидкість трафіку
MS	Mobile Station	Мобільна станція
MTU	Maximum Transfer Unit	Міксимальний блок передавання
NAS	Non-Access Stratum	Транспортний шар
NMS	Network Management Service	Сервіс управління мережею
NRTPS	Non-Real Time Polling Service	Функція голосування нереального часу
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ортогональне частотне мультиплексування
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	Множинний доступ з ортогональним частотним мультиплексуванням
OLSM	Open Loop Spatial Multiplexing	Просторове мультиплексування з розімкнутим контуром
PBCH	Physical Broadcast Channel	Фізичний ширококомовний канал
PDCCH	Physical Downlink Control Channel	Фізичний низхідний канал управління
PDCP	Packet Data Convergence Control Protocol	Протокол управління конвергенцією пакетних даних
PDNs	Protocol Data Units	Протокольні блоки даних
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel	Фізичний низхідний спільний канал
PERL	Packet Error Loss Rate	Імовірність втрати пакету
PF	Proportional Fairness	Проторційна справедливість
PGW	PDN Gateway	Шлюз протокольних блоків даних
PHICH	Physical Hybrid Indicator Channel	Фізичний гібридний індикатор каналу
PHY	Physical Layer	Фізичний рівень
POW	Poor Or Worse	Сервіс «Погано або Гірше»
PRBs	Physical Resource Blocks	Фізичний ресурсний блок
PS	Privacy Sublayer	Підрівень приватності
PSNR	Peak Signal To Noise Ratio	Пікове співвідношення сигнал/шум



P-SS	Primary Synchronization Signal	Первинний сигнал синхронізації
PUCCH	Physical Uplink Control Channel	Фізичний висхідний канал управління
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel	Фізичний висхідний спільний канал
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Квадратурна амплітудна модуляція
QCI	QoS Class Identifier	Ідентифікатор класу якості обслуговування
QoE	Quality Of Experience	Якість сприйняття
QoS	Quality Of Service	Якість обслуговування
QPSK	Quadrature Phase Shift Key	Квадратурна фазова маніпуляція
RAN	Radio Access Network	Мережа радіодоступу
RBG	Resource Block Group	Група ресурсних блоків
RF	Radio Frequency	Чадіочастота
RI	Rank Indicator	Показник рангу
RLC	Radio Link Control	Управління радіоканалом
RLR	Receive Loudness Rating	Оцінка отриманої гучності
RM	Resource Management	Управління ресурсами
RMF	Resource Manager Function	Функція управління ресурсами
RRC	Radio Resource Control	Контроль радіоресурсів
RRM	Radio Resource Management	Управління радіоресурсами
RTPS	Real Time Polling Service	Функція голосування реального часу
SAE	System Architecture Evolution	Еволюція системної архітектури
SCF	Subscriber Control Function	Функція контролю абонентів
SDUs	Service Data Units	Сервісні блоки даних
SF	Spreading Factor	Параметр розширення
SFBC	Space Frequency Block Code	Просторово-частотний блочний код
SFID	Service Flow Identifier	Ідентифікатор сервісного потоку
SG	Signaling Gateway	Сигнальний шлюз
SGW	Serving Gateway	Обслуговуючий шлюз
SIMO	Single Input Multiple Output	Антенна система «один до багатьох»
SINR	Signal Interference Noise Ratio	Співвідношення сигнал/інтерференційна завада
SIP	Session Initiation Protocol	Протокол ініціювання сеансів

SIR	Signal To Interference Ratio	Співвідношення сигнал/інтерференція
SISO	Single Input Single Output	Одноантенна система
SMF	Service Manager Function	Функція керування послугою
SNR	Signal To Noise Ratio	Співвідношення сигнал/шум
SQoS	System Quality Of Service	Системна якість обслуговування
SRBs	Signaling Radio Bearers	Сигналізаційна радіопослуги
SRSs	Sounding Reference Signals	Зондуючі опорні сигнали
S-SS	Secondary Synchronization Signal	Вторинний сигнал синхронізації
ST	Subscriber Terminal	Термінал абонента
STBC	Space Time Block Code	Просторово-часовий блочний код
SU-MIMO	Single User Multi Input Multi Output	Багатоантенна система в однокористувацькому режимі
SVD	Singular Value Decomposition	Сингулярний розклад
TB	Transport Block	Транспортний блок
TCF	Traffic Condition Function	Функція стану трафіку
TDD	Time Division Duplex	Дуплекс із часовим розділенням
TDMA	Time Division Multiple Access	Множинний доступ з часовим розділенням
TE	Terminal Equipment	Термінальне обладнання
TF	Transmission Function	Функція передавання
TM	Transparent Mode	Прозорий режим
TPMI	Transmit Precoding Matrix indication	Індикація пеердачі матриці попереднього кодування
TXD	Transmit Diversity	Рознесення передавання
UE	User Equipment	Обладнання користувача
UGS	Unsolicited Grant Service	Негарантоване обслуговування
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	Універсальна мобільна телекомунікаційна система
VOIP	Voice Over Internet Protocol	Передавання телефонії у IP мережі
WBBA	Wireless Broadband Access	Безпровідний ширококутний доступ
ZF	Zero Forcing	Повернення до нуля
ZF-SIC	Zero Forcing- Successive Interference Cancellation	Повернення до нуля з подальшою компенсацією інтерференції

## ВСТУП

Дисертаційну роботу присвячено підвищенню якості надання послуг в безпроводних телекомунікаційних системах четвертого покоління на основі технології LTE (Long Term Evolution). В роботі це досягається за рахунок адаптації пропускної здатності радіоканалу до умов завад, покращення міжрівневої взаємодії сервісної архітектури LTE та підвищення показника справедливості розподілу ресурсних блоків між абонентами мережі.

**Актуальність теми.** Четверте покоління (4G) безпроводних широкосмугових мереж, таких як IEEE 802.16e, проект партнерства третього покоління (3GPP) і LTE, було розроблено на основі вимог QoS для надання різних видів широкосмугових телекомунікаційних сервісів.

LTE – це перспективне покоління мобільного зв'язку 4G, що характеризується високою швидкістю передачі даних і підвищеною якістю голосового зв'язку. До четвертого покоління прийнято відносити перспективні технології, що дають змогу здійснювати передавання даних рухомим абонентам зі швидкістю, що перевищує 10 Мбіт/с.

Забезпечення високих значень пропускної здатності у системі LTE базується на трьох основних технологіях: мультиплексування за допомогою ортогонального частотного поділу OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), передавання сигналів за допомогою багатоантенних систем MIMO (Multiple Input Multiple Output) і еволюційна системна (сервісна) архітектура мережі (System Architecture Evolution).

Проблематикою забезпечення якості сприйняття послуг та підвищення пропускної здатності радіоканалу займалися такі вчені: Лемешко О.В., Безрук В.М., Бунін С.Г., Беркман Л.Н., Dahrouj H., Erik Dahlman, Dave C. Robinson, Климаш М.М. та багато інших.

Проте, у роботах всіх перелічених авторів відсутній комплексний підхід до підвищення пропускної здатності з одночасним забезпеченням якості

сприйняття послуг на основі підвищення справедливості розподілу ресурсів між абонентами в комірці LTE.

Головне протиріччя, на яке спрямована робота, полягає у розробленні методів оцінки та збільшення пропускної здатності сучасних безпроводних систем зв'язку з дотриманням високої якості обслуговування користувачів (малої ймовірності бітової помилки) в складних умовах багатопроменевого просторового каналу з глибокими завмираннями сигналів. Вирішення полягає у використанні антенних систем як на приймальному, так і на передавальному кінцях каналу зв'язку (так звані MIMO (Multiple Input-Multiple Output) - системи) разом із технологією OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Крім пропускної здатності, важливою характеристикою системи є ймовірність бітової помилки. Тому необхідно постійно підтримувати баланс між цими двома важливими для користувача характеристиками. Цього можна досягти за рахунок удосконалення методів та моделей розподілу ресурсів в комірці LTE.

Отже, підвищення якості сприйняття послуг у мережах LTE на основі адаптації радіоканалу, покращення показника справедливості розподілу ресурсів та удосконалення міжрівневої взаємодії сервісної архітектури LTE є актуальною науковою задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з науковим напрямом кафедри телекомунікацій «Інфокомунікаційні системи та мережі», з положеннями «Концепції національної інформаційної політики», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні», Закону України «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки».

Дисертаційна робота виконувалась в рамках держбюджетних науково-дослідних тем «Моделі та структури конвергентних телекомунікаційних мереж на основі CLOUD – технологій», (2013-2014 рр.), № держреєстрації 0113U003184, «Методи побудови та моделі інформаційно –телекомунікаційної

інфраструктури на основі SDN – технологій для систем електронного урядування» (2015-2016 рр.), № держреєстрації 0115U000444.

**Мета роботи** – підвищення якості сприйняття послуг користувачами мережі LTE на основі адаптивного формування пропускної здатності каналу передавання, удосконалення міжрівневої взаємодії сервісної архітектури LTE та покращення показника справедливості розподілу ресурсних блоків.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Аналіз основних завдань та методів забезпечення якості надання та сприйняття послуг у мережах зв'язку четвертого покоління на основі сервісної архітектури LTE.

2. Дослідження моделей підвищення пропускної здатності каналу LTE для покращення параметрів якості надання та сприйняття послуг на основі методів компенсації інтерференції, формування діаграми спрямованості антени базової станції, прогнозування індикатора якості каналу.

3. Розроблення нових моделей підвищення пропускної здатності на основі вибору кількості портів антени та кількості OFDM символів з урахуванням адаптації діаграми спрямованості антени базової станції до режиму обслуговування множини користувачів.

4. Удосконалення методів розподілу ресурсів радіоканалу LTE між користувачами на основі показника справедливості розподілу та поділу користувачів на групи в залежності від значення сигнал/шум на вході приймача UE.

5. Розроблення моделі передавання мультимедійних даних через радіоканал LTE для перевірки ефективності запропонованих методів та алгоритмів.

*Об'єкт дослідження* – процес формування пропускної здатності радіоканалів у мережі LTE із забезпеченням якості сприйняття послуг користувачами.

*Предмет дослідження* – моделі та алгоритми забезпечення якості сприйняття послуг у мережі LTE на основі моделі її сервісної архітектури.

*Методи дослідження.* Дослідження виконано на основі використання основних положень теорії ймовірності та математичної статистики, аналітичного та імітаційного моделювання, а також теорії телекомунікаційних систем та мереж.

**Наукова новизна** роботи полягає у тому, що:

1. Вперше запропоновано модель групової відеотрансляції у мережі LTE, яка, на відміну від відомих, є багат шаровою та передбачає можливість передавання даних з використанням множини видів модуляції і кодування, що дає змогу об'єктивно оцінити баланс між якістю сприйняття послуги та справедливістю розподілу ресурсів.

2. Удосконалено модель формування пропускної здатності радіоканалу LTE на основі вибору кількості портів MIMO та структури OFDM символів, яка, на відміну від відомої, враховує режим формування діаграми спрямованості антенної системи базової станції LTE та дає змогу підвищити пропускну здатність виділеного для користувача каналу.

3. Набув подальшого розвитку метод розподілу ресурсів радіоканалу LTE нульового типу за рахунок введення коефіцієнта справедливості розподілу ресурсів, який дає можливість врахувати співвідношення між необхідною та наданою пропускну здатністю, а його усереднення дає змогу визначити справедливість розподілу ресурсів в середньому у мережі.

4. Набув подальшого розвитку метод розподілу ресурсів радіоканалу LTE першого типу за рахунок формування віконного механізму групування абонентів за значенням співвідношення сигнал/шум, що дало змогу підвищити середню якість сприйняття послуг у комірці мережі.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що:

1. Урахування режиму формування діаграми спрямованості антенної системи базової станції у процесі вибору способу компенсації інтерференції

дало змогу підвищити пропускну здатність радіоканалу LTE до 25 %.

2. Модель формування пропускну здатності радіоканалу LTE на основі вибору кількості портів антенної системи та структури OFDM символів дала змогу визначити співвідношення між видом модуляції, швидкістю турбокодера, розмірністю антенної системи MIMO та досяжною результуючою пропускну здатністю радіоканалу, на основі чого стає можливим використання індикатора якості каналу для удосконалення міжрівневої взаємодії сервісної моделі LTE.

3. На основі введення показника справедливості розподілу ресурсів за методом розподілу ресурсів нульового типу досягнуто підвищення справедливості розподілу ресурсів у комірці у середньому на 30%.

4. Результати, отримані з допомогою запропонованої моделі багатопарової відеотрансляції, дають змогу обрати баланс між двома стратегіями розподілу ресурсів (максимізація QoE та максимізація показника справедливості розподілу ресурсів), Зокрема, для символної швидкості 120 ксим/с, перша стратегія забезпечує на 34% вищий рівень показника QoE, однак друга стратегія дає змогу на 21% підвищити показник справедливості розподілу ресурсів.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі, в лекційних курсах і лабораторних роботах, які проводяться для студентів Національного університету “Львівська політехніка” за спеціальністю “Інформаційні мережі зв’язку”, зокрема “Технології мереж мобільного зв’язку”.

Результати роботи використано:

– у компанії Horizon Scope Mobile Telecom (м. Багдад Аль-Мансор, Ірак) для підвищення пропускну здатності радіоканалу та підвищення ефективності розподілу ресурсів у комірці LTE;

– у ПП «Цифрові технології» (м. Львів) для покращення якості обслуговування абонентів при наданні мультимедійних послуг;

– у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсу лекцій з дисципліни «Технології мереж мобільного зв'язку».

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та всебічно обговорені на 11-ти міжнародних науково-технічних конференціях, наукових семінарах та симпозіумах: Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в 21 столітті» (м. Харків, 2013 р.), 12-та Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії" TCSET'2014 (Львів-Славсько, 2014 р.), Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій-2014" (м. Київ, 2014 р.), X<sup>th</sup> International Conference "Prespective Technologies and Methods in MEMS Design" (м. Львів, 2014), 2014 First International Scientific-Practical Conference Problems Of Infocommunications Science And Technology IEEE PIC S&T 2014 (м. Харків, 2014 р.), Всеукраїнська конференція "Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014" (м. Львів, 2014 р.), XXII Ukrainian–Polish conference CADMD'2014 (м. Львів, 2014 р.), 5<sup>th</sup> Annual BEAR PGR (Birmingham, United Kingdom, 2014), XIIIth International Conference, the experience of designing and application of CAD systems in microelectronics CADSM 2015 (Polyana-Svalyava, 2015 р.), 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015) (м. Львів, 2015 р.), 13 Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії" TCSET'2016 (Львів-Славсько, 2016 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень, які викладені у цій дисертаційній роботі, опубліковано 23 наукові праці, серед них, 2 статті у закордонних виданнях, що входять до переліку міжнародних наукометричних баз, 8 статей у фахових виданнях України, які входять до переліку міжнародних



наукометричних баз, 13 публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, викладені в дисертації, одержані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: у роботах [1-2, 4,8] – постановка задач досліджень та розробка імітаційної моделі, [3,5] – методика дослідження, [6,7,9,10] – методичні основи підвищення ефективності радіоканалу у системі LTE.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг роботи складає 145 сторінок друкарського тексту, із них 7 сторінок вступу, 109 сторінок основного тексту, 43 рисунки, 16 таблиць на 16 сторінках, список використаних джерел зі 103 найменувань, 1 додаток.

## РОЗДІЛ 1.

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В LTE МЕРЕЖАХ

У першому розділі проаналізовано методи, алгоритми та засоби забезпечення якості обслуговування в LTE мережах. Проведено аналіз наукових праць за тематикою роботи та сформульовано наукову задачу. Подано зв'язок між поняттями QoE та QoS у безпроводних мережах 4-го покоління.

#### 1.1 Основні завдання із забезпечення QoS у безпроводних мережах широкосмугового доступу

Четверте покоління (4G) безпроводних мереж широкосмугового доступу, розроблене на основі вимог QoS для надання різного роду веб-послуг.

Основні вимоги до систем безпроводного широкосмугового доступу (БШСД) такі [24]:

- до фізичного рівня (PHY) - методів множинного доступу, адаптації, організації дуплексу, модуляції і т.д.;
- до MAC-рівня (управління доступом до середовища) - до сервісів між MAC-рівнем і підрівнем конвергенції, форматів фрейму, сервісів та механізмів поліну (варіант опитування готовності пристроїв), що забезпечує підтримку якості обслуговування (QoS);
- до підрівня конвергенції (CS), призначеного для організації взаємодії між MAC-рівнем та більш високими рівнями мережі;
- до рівня безпеки – для управління алгоритмами шифрування на ділянці між базовою та мобільною станціями.

MAC-рівень IEEE 802.16 включає три підрівні зображені на рис. 1.1:

- Підрівень перетворення потоків послуг (CS - Convergence Sublayer);

- Основний підрівень (CPS - Common Part Sublayer);
- Підрівень безпеки (PS - Privacy Sublayer).

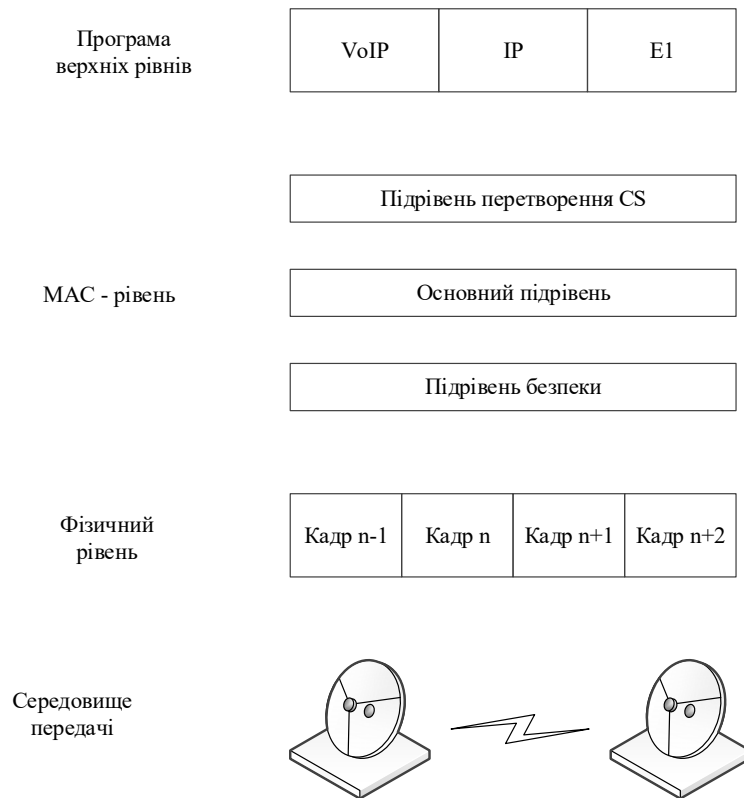


Рис. 1.1 Структура MAC-рівня стандарту IEEE 802.16e

На рис. 1.2 представлено стек протоколів LTE-EPC [25], який використовується для наскрізного з'єднання. Основним спрощенням запропонованого підходу є об'єднання SGW/PGW, яке усуває необхідність у використанні інтерфейсів S5 та S8. Проте, всі специфіковані протоколи збережено.

Фізичний рівень відповідає за передавання інформації MAC рівня через радіоінтерфейс. Він реалізує функції адаптації (AMC), управління потужністю, пошуку комірок та вимірювання параметрів сигналу для задач рівня управління радіоканалом.

Рівень доступу до середовища здійснює відображення логічних каналів у транспортні, мультиплексування блоків даних від одного або декількох логічних каналів у транспортні блоки для доставки їх засобами фізичного рівня,

демультиплексування блоків даних, інформування про процес оброблення блоків даних, виправлення помилок засобами HARQ, призначення пріоритетів МС для динамічного керування ресурсами, призначення пріоритетів логічним каналам у межах однієї МС.

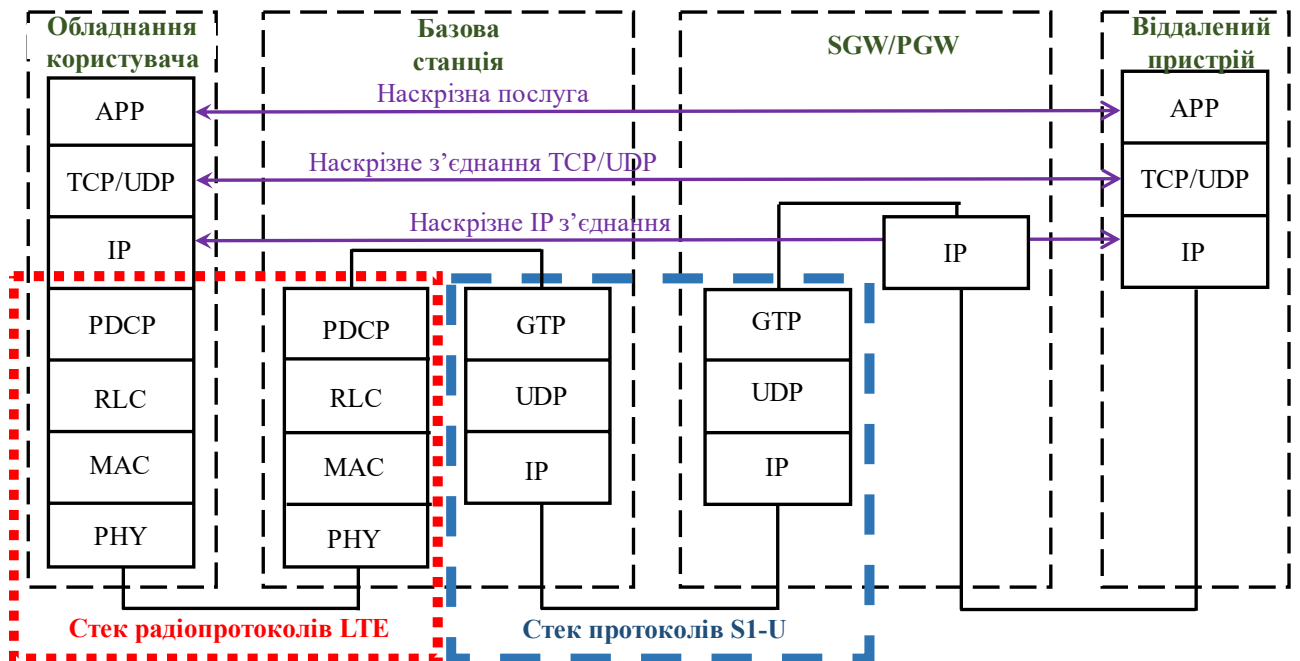


Рис. 1.2. Стек протоколів LTE-EPC

Рівень управління радіоканалом працює у одному з трьох режимів: прозорий, без підтвердження, із підтвердженням. Він забезпечує пересилання пакетів даних вищих рівнів, виправлення помилок засобами ARQ, їх об'єднання, сегментування і відновлення у вигляді блоків даних рівня управління радіоканалом. Також цей рівень виконує повну множину операцій із власними пакетами даних у залежності від режиму пересилання.

Рівень управління радіоресурсами забезпечує поширення службової інформації, яка стосується площин доступу та транспорту, управління з'єднаннями, підтримку функцій безпеки, до чого належить контроль політик обміну ключами між абонентським терміналом і мережею радіодоступу. Однією з важливих функцій у контексті дискретної роботи є управління послугами передавання по радіоєфіру.

Рівень управління конвергенцією пакетних даних здійснює компресію заголовків даних IP, пересилання даних в площині користувача чи керування, управління послідовністю номерів пакетів даних. Він відповідає за правильність послідовності доставки пакетів, усунення їх можливих дублікатів, відображення послуг передавання по радіоефіру у режим передавання з підтвердження рівня управління радіоканалом. Також цей рівень здійснює шифрування і дешифрування даних площини користувача, контролює тривалість їх доставки з метою видалення неактуальної інформації, що циркулює у мережі.

Рівень протоколів, що не реалізують функції доступу, відповідає за комунікацію вищого рівня між МС та вузлом управління мобільністю. Цей рівень забезпечує підтримку мобільності абонентів і управління сесіями передавання даних IP між МС та крайовим шлюзом пакетної мережі PDN GW.

Формування усіх вимог по забезпеченню якості обслуговування відбувається на МАС – рівні.

## **1.2. Класифікація та характеристики якості обслуговування в LTE**

Різноманітні послуги мають відповідну класифікацію і для кожного класу специфіковані якісні показники QoS (Quality of Service). Характеристики QoS визначають [26, 27]:

- Пріоритетність трафіку;
- Допустимі затримки;
- Надійність передачі;
- Необхідні швидкості передачі: максимально підтримувана швидкість трафіку і мінімальну зарезервовану швидкість;
- Допустимий часовий джитер (нерівномірність в періодичності доставки пакетів).

Під час реалізації транспортного з'єднання будь-якому потоку даних (service flow) присвоюють SFID (Service Flow Identifier) ідентифікатор (32 біти). При призначенні SFID індивідуально по висхідному і низхідному потоці (в напрямках «вгору» і «вниз») вказують значення параметрів QoS, які можуть бути абсолютно різними, наприклад, при односпрямованій передачі відеотрафіку.

Функцію по виділенню каналного ресурсу з урахуванням забезпечення QoS реалізує планувальник (scheduler). Це ПЗ в базовій станції, що надається виробником апаратури. При здійсненні передачі по низхідному потоці (БС (базова станція) → МС (мобільна станція)) планувальник завжди знає повну інформацію про всі обслуговувані потоки даних і може забезпечити оптимальний розподіл каналного ресурсу. При організації передачі по висхідному потоці (МС → БС) існує 5 типів трафіку в залежності від їх пріоритету та вимог до затримок. У трьох з них передбачене опитування (polling) МС для того, щоб оперативно змінювати каналний ресурс, що виділяється для конкретної МС:

- UGS - Unsolicited Grant Service: передача в реальному часі сигналів і телефонних потоків (E1) та VoIP; допустима затримка менша  $5^{-10}$  мс в одному напрямку при  $BER = 10^{-6} \dots 10^{-4}$ ;
- ertPS - extended real time Polling Service, необхідна для передачі по висхідному потоці телефонії з використанням детектора мовної активності абонента;
- rtPS - real time Polling Service: передача потоків реального часу з пакетами змінної довжини (наприклад, відео);
- nrtPS - non-real-time Polling Service: підтримка потоків змінної довжини при передачі файлів в широкосмуговому режимі;
- BE - Best Effort: інший трафік.

З метою оптимізації потоків, які передаються передбачений спеціальний механізм видалення повторюваних фрагментів заголовків PHS (Payload Header

Suppression) IP-датаграм і АТМ комірок, які відновлюються на приймальній стороні.

Інформаційне повідомлення приходять на БС у вигляді потоку пакетів SDU (Service Data Unit). На верхньому підрівні SDU перетворюють в MAC PDU (Protocol Data Unit), при цьому кілька SDU, переданих одному абоненту, можуть бути упаковані в одному PDU. Потім пакети даних MAC PDU транслюють на фізичний рівень і передають по каналу зв'язку. Кожному активному з'єднанню привласнюють ідентифікатор CID (Connection Identifier) довжиною 16 біт. Кожному SFID відповідає власний CID.

### **1.3. Керування параметрами радіоінтерфейсу**

Будова SF-потоків забезпечує деталізацію QoS та ізоляцію між SF у радіоінтерфейсі. Керування радіоінтерфейсом несе відповідальність за забезпечення QoS шляхом присвоєння ресурсних блоків фізичного рівня (PHY) в SF середовищах для висхідного і низхідного потоку. Цей механізм називають розподілом смуги пропускання. Рішення щодо планування базується на основі відповідних змінних стану QoS для SF таких як довжина буфера, затримка вхідного пакету, вимоги QoS, такі як MRTR та максимальна затримка, а також положення робочої частоти мобільної станції відносно загального спектру. В загальному [28, 30, 32, 33]:

- Потоки з меншою максимальною затримкою або потоки з більшим MRTR володіють вищим пріоритетом при прийнятті рішення;
- SF потоки з «повільними» пакетами чи великими довжинами буферів також отримують вищий пріоритет;
- Мобільні станції, які знаходяться в кращих частотних умовах володіють вищим пріоритетом задля забезпечення високої пропускну здатності сектора в цілому.

Керування радіоінтерфейсом може змінюватись за рівнями пріоритету пакетів всередині SF в залежності від потоку трафіку, використовуючи такі параметри, як, наприклад, величина DSCP (intra-SF). Разом з тим, параметр пріоритету трафіку може використовуватись в подальшому для диференціації трафіку, асоційованого з потоками одного типу (inter-SF).

На рис. 1.3 зображено гістограму розподілу трафіку залежно від частоти появи його значень.

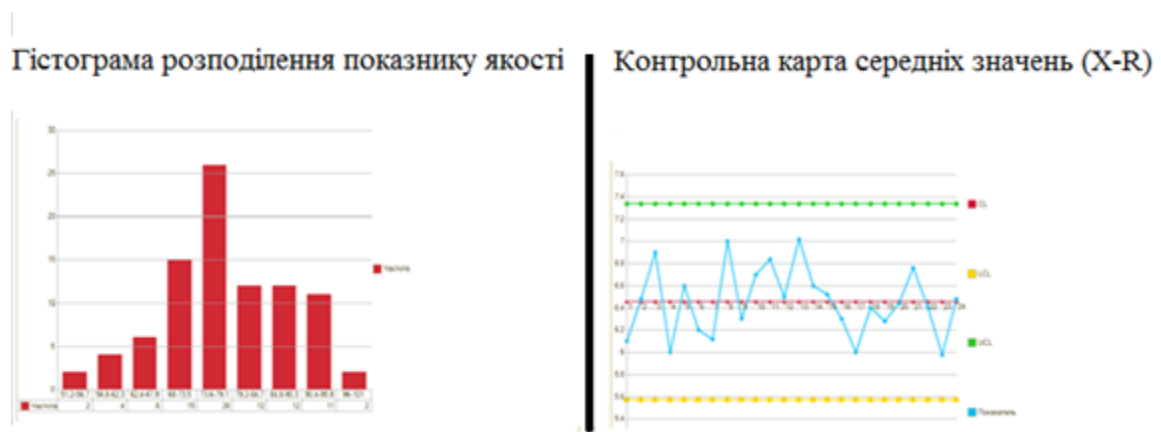


Рис. 1.3 Гістограма розподілу трафіку

Аналогічно мережам стандарту UMTS, в мережах LTE доставка здійснюється за допомогою наскрізних каналів (bearer) з відповідною якістю обслуговування (Quality of Service, QoS).

В рамках вимог до QoS всі типи послуг поділяються на 9 класів, кожному з яких відповідає ідентифікатор QCI (QoS Class Identifier). Крім цього, організовані для передачі трафіку наскрізні канали розділяються на 2 групи відповідно до типу виділеного ресурсу:

- З гарантованою швидкістю передачі GBR (Guaranteed Bit Rate);
- З негарантованою швидкістю передачі Non-GBR.

Якісні показники передачі для трафіку 9 різних класів наведені в табл.1.1

При реалізації передачі даних із гарантованою швидкістю eNB повинен управляти ресурсами в динамічному режимі. Послуги класів QCI 1,2, 3 і 7 - це сервіси, що надаються абоненту в реальному часі по протоколу UDP / IP.



Основним обмежуючим фактором для їх реалізації є допустима затримка в доставці пакетів.

Значення PERL (Packet Error Loss Rate) показує надійність передачі пакетів, яке оцінюється за відносною величиною неприйнятих пакетів. Величина  $PERL \leq 10^{-6}$  досягається при доставці пакетів за допомогою протоколу TCP / IP. Найбільший пріоритет має сигнальний трафік.

Таблиця 1.1

## Відповідність значень QCI характеристик трафіку

QCI	Тип ресурсу	Пріоритет	Затримка (мс)	Packet error loss rate	Приклади послуг
1	GBR	2	100 ms	$10^{-2}$	Телефонія в режимі реального часу
2		4	150 ms	$10^{-3}$	Відеотелефонія, відео в режимі реального часу
3		3	50 ms	$10^{-3}$	Ігри в режимі реального часу
4		5	300 ms	$10^{-6}$	Відео з буферизацією
5	Non-GBR	1	100 ms	$10^{-3}$	Сигналізація (IMS)
6		6	300 ms	$10^{-6}$	Відео з буферизацією, TCP/IP послуги для пріоритетних користувачів
7		7	100 ms	$10^{-6}$	Аудіо, відео в режимі реального часу, інтерактивні ігри
8		8	300 ms	$10^{-3}$	Відео з буферизацією, TCP/IP послуги
9		9		$10^{-6}$	

Клас 9 застосовується за замовчуванням при доставці TCP / IP трафіку (читання файлів з Інтернету, E-mail, відео) непривілейованим користувачам.

Передачу сервісного потоку даних конкретної послуги здійснюють за допомогою наскрізного каналу (bearer) відповідного класу QCI. Основними параметрами, котрі характеризують наскрізний канал, є:

- для GBR класів передачі гарантована і максимальна швидкість передачі, яка не може бути перевищена;
- встановлений і зберігаючий пріоритет.

Для наскрізних каналів з негарантованою швидкістю передачі встановлюють сумарну швидкість передачі потоків по всіх каналах. Наскрізні канали GBR класів - це виділені канали.

Динамічне виділення каналного ресурсу здійснює планувальник (scheduler) в eNB. Робота планувальника проводиться відповідно до:

- стану радіоканалів з відповідними абонентськими терміналами;
- атрибутів наскрізних каналів;
- характеристик передачі по наскрізному каналі, в тому числі станом буферів абонентської станції при передачі по висхідному потоці;
- завад в сусідніх комірках і можливості міжкоміркових хендоверів для покращення умов роботи абонентських терміналів, розташованих поблизу комірок.

Принцип функціонування планувальника також пов'язаний з програмами управління доступом до мережі та управління ситуаціями перевантаження на радіоінтерфейсі.

#### **1.4 Аналіз методів забезпечення параметрів QoS в сервісно-орієнтованій архітектурі LTE**

Концепція системи QoS для мереж UMTS мобільного зв'язку 3-го покоління визначена в специфікації TS 23.107, і використовується також для мереж LTE 4-го покоління [34, 35, 36].

На рис. 1.4 розглянуто архітектуру системи якості обслуговування і передавання послуг у рамках такої системи, для випадку, коли зв'язок здійснюється між кінцевим обладнанням (КО), підключеним до призначеного

для користувача терміналу мобільної мережі, і термінальним обладнанням, розташованим в зовнішній пакетній мережі.

Аналогічно поняттю наскрізного каналу вводиться поняття *наскрізної послуги* (end — to — end service) як послідовність дій між двома кінцевими користувачами і, відповідно, частин послуг — по їх відношенню до визначених мережевим складовим: в локальному каналі "КО — призначений для користувача термінал" (Terminal Equipment / Mobile Terminal local Bearer Service), в каналі мережі LTE (LTE Bearer Service), в зовнішньому каналі (External Bearer Service). Таким чином, виникає багаторівнева взаємодія при передачі послуги в різних мережеских вузлах і на різних рівнях.

Передача послуги з мережі LTE розглядається, відповідно до мережевої архітектури, окремо в мережі радіодоступу (Radio Access Bearer Service), де забезпечується конфіденційне передавання призначених для користувача даних або із заздалегідь вибраним або встановленим за замовчуванням рівнем якості обслуговування, і у базовій пакетній мережі (Core Network Bearer Service), що також може підтримувати різну якість обслуговування.



Рис. 1.4. Архітектура системи якості обслуговування [55]

Послугу в мережі радіодоступу реалізують двома частинами: в радіоканалі (Radio Bearer Service) і в механізмі радіодоступу (Access Bearer Service). Реалізація послуги в радіоканалі містить усі аспекти, що стосуються передавання даних по радіоінтерфейсу, включаючи сегментацію і повторне збирання призначених для користувача пакетів. Крім того, на фізичному рівні (Physical Radio Bearer Service) здійснюється управління підпотокom призначених для користувача даних. Механізм радіодоступу забезпечує на фізичному рівні (Physical Bearer Service) передавання даних між мережею радіодоступу і базовою мережею.

Нарешті, проходження послуги в "магістральному" каналі (Backbone Network Bearer Service) розглядається у функціональній сукупності рівнів 1 і 2 і призначених вимог якості обслуговування.

#### *1.4.1. Основні функції мережі LTE, що належать до керування якістю обслуговування в площині користувача*

*Функція відображення (MF, Mapping Function)* забезпечує маркування кожного призначеного для передавання пакету даних відповідними параметрами QoS.

*Функція класифікації (CF, Classification Function)* призначена для виставлення пакетам параметрів QoS, призначених для певного АТ, у тому випадку, якщо для цього АТ в мережі встановлено декілька каналів передавання послуг.

*Функція управління ресурсами (RMF, Resource Manager Function)* розподіляє доступні ресурси між послугами відповідно до параметрів QoS.

*Функція узгодження (очищення) трафіку (TCF, Traffic Conditioner Function)* забезпечує узгодження між потоком призначених для користувача даних і встановленим рівнем якості обслуговування. Ті пакети даних, які не

відповідають виставленим параметрам QoS, будуть відкинуті або помічені як невідповідні для наступного відкидання після накопичення.

На рис. 1.5 показана взаємодія функцій керування якістю обслуговування в призначеній для користувача площині [25].

Функція класифікації, реалізована в абонентському терміналі АТ і сигнальному шлюзі СШ, призначає пакети даних, отримані із зовнішнього (чи локального) каналу в послугу мережі LTE з відповідними параметрами QoS. Функція узгодження трафіку, при необхідності, забезпечує узгодження призначеного для користувача потоку у висхідному (у АТ) і низхідному (у СШ) напрямках зі встановленими параметрами QoS. Далі функція відображення забезпечує кожен пакет даних спеціальним QoS-індикатором, відправляючи того в мережу, що вимагає виділення відповідних ресурсів — за це відповідальна функція управління ресурсами, реалізована в кожному мережевому вузлі.

У площині управління зосереджені функції, необхідні для реалізації механізмів управління і контролю.

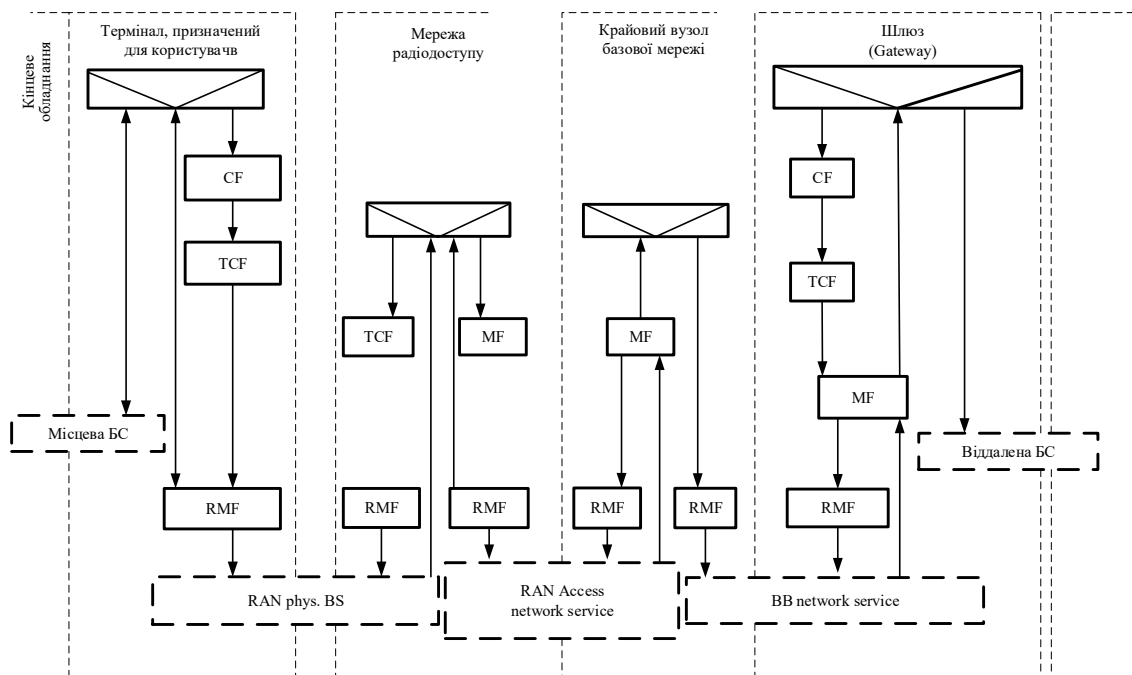


Рис. 1.5. Функції керування якістю обслуговування в призначеній для користувача площині

#### *1.4.2. Основні функції мережі LTE, що належать до керування якістю обслуговування в площині керування*

*Функція управління послугами (SMF, Service Manager Function) є координуючою функцією при установці, модифікуванні і керуванні послугами, а також що координує функції керування якістю обслуговування в призначеній для користувача площині.*

*Функція (TF, Translation Function) трансляції перетворює внутрішні примітиви послуг мережі LTE в модулі різних протоколів взаємодіючих зовнішніх мереж, включаючи перетворення атрибутів послуг мережі LTE в параметри QoS протоколів зовнішніх мереж.*

*Функція управління можливостями (A/CCF, Admission / Capability Control Function) забезпечує інформацією про усі можливі ресурси мережевих вузлів, визначаючи при кожному запиті (чи модифікуванні) послуги, чи можуть мережеві вузли забезпечити необхідні ресурси. Ця функція також контролює можливість надання самої послуги, тобто чи реалізована в мережі запитана послуга.*

*Функція керування підпискою (SCF, Subscription Control Function) забезпечує контроль доступності абонентам певних послуг з необхідними параметрами QoS.*

### **1.5. Особливості надання послуг у мережах LTE**

Концепція надання послуг передбачає наявність чотирьох *класів якості обслуговування* або *класів трафіку* [25, 54]:

- *голосовий (розмовний);*
- *потоківий;*
- *інтерактивний;*
- *фоновий.*

Головною відмінністю між названими класами є чутливість до затримок: найбільш чутливим є голосовий трафік, найменш чутливим — фоновий трафік. Голосовий і потоковий класи призначені для використання в реальному масштабі часу. Інтерактивний і фоновий класи використовуються для традиційних інтернет-застосувань: інтернет-навігація, електронна пошта, віддалений зв'язок та ін. При цьому трафік інтерактивного класу має вищий пріоритет, ніж трафік фонового класу. Коротко розглянемо особливості послуг різних класів.

Найбільш часто використовуваним видом послуг голосового класу є телефонна розмова, причому, якщо в стандартах першого і другого покоління, наприклад, традиційних мережах GSM, передача мови здійснювалася за допомогою каналної комутації, то в сучасних системах стільникового зв'язку мова передається пакетним способом (VoIP, Voice over IP). При цьому трафік є симетричним (чи майже симетричним). Особливості людського слуху і зору при здійсненні сеансу зв'язку в реальному часі пред'являють досить жорсткі вимоги до якості мовного потоку. Фундаментальними характеристиками QoS в даному випадку є фіксована, по можливості, мінімальна часова затримка між окремими мовними пакетами в загальному мовному потоці, а також фіксована структура мовних пакетів. Суб'єктивні оцінки сприйняття мови показують, що наскрізна затримка мови не повинна перевищувати 400 мс — інакше розмова стає практично неможливою.

Отже, існують мережеві послуги різних класів, яким необхідно призначити додаткові атрибути в системі якості обслуговування. Перерахуємо список параметрів QoS, по яких здійснюється відносна градація користувачів:

1. Трафіковий клас (голосовий, потоковий, інтерактивний, фоновий);
2. Максимальна швидкість передавання даних (у Кбіт/с). Цей параметр визначає максимальне число біт, що доставляються мережею LTE (чи в мережу LTE) за певні інтервали часу;

3. Гарантована швидкість передавання даних (у Кбіт/с) визначає гарантоване число біт, що доставляються мережею за певні інтервали часу;
4. Порядок доставки (Так/ні). Параметр, що показує, чи забезпечує наскрізний канал послідовну доставку пакетів даних або ні. Фактично цей параметр показує відмінність протоколу передавання даних від призначеного для користувача PDP-протоколу;
5. Максимальний розмір (у байтах) пакетів даних, що переносять вміст послуги (SDU, Service Data Unit). Цей параметр слід відрізнити від параметра MTU (Maximum Transfer Unit), використаного в IP-протоколі;
6. Інформація (у бітах) про формат пакетів даних, що переносять вміст послуги, необхідна в мережі радіодоступу в цілях забезпечення функціонування RLC-протоколу в прозорому режимі;
7. Відносний рівень помилково переданих пакетів даних, що переносять вміст послуги. Параметр використовується для вибору належної схеми модуляції / кодування передавання даних по мережі радіодоступу;
8. Залишковий коефіцієнт помилок, що відображає число помилково переданих бітів в доставлених пакетах даних, які переносять вміст послуги. Також використовується для вибору належної схеми модуляції / кодування передавання даних по мережі радіодоступу;
9. Можливість доставки спотворених пакетів даних, що переносять вміст послуги (так/ні). Параметр використовується при ухваленні рішень про пересилку спотворених пакетів даних;
10. Затримка передавання (у мс) визначає допустиме відхилення значення затримки в мережі радіодоступу від загального часу затримки в наскрізному каналі серед 95% значень затримок доставлених пакетів даних впродовж часу існування усієї послуги;
11. Пріоритет в управлінні трафіком відображає відносну важливість даного потоку даних в порівнянні з іншими потоками. Параметр застосовується до послуг інтерактивного класу, забезпечуючи диспетчеризацію трафіку;



12. Призначення / відміна пріоритету. Використовується для виявлення пріоритетних відмінностей між каналами передавання послуг, коли виконуються операції за призначенням і зняттям каналів в умовах обмеження ресурсів;
13. Статистичний дескриптор джерела (мовний / невідомий). Розмовна мова має добре відомі статистичні параметри. Тому, в цілях інформування про те, що пакети даних мають мовну природу, цей факт може бути експериментально (на основі підрахунку) виявлений в різних точках;
14. Індикатор службової інформації (так/ні), визначений тільки для послуг інтерактивного класу, показує природу інформації (службова або призначена для користувача) в прийнятих пакетах. Якщо індикатор встановлений в значення «Так», то АТ повинен встановити в «1» пріоритет керування трафіком. Цей параметр є додатковим в системі якості обслуговування.
15. Виділене призначення / відміна пріоритету — «посилений» параметр призначення / відміна пріоритету, що містить збільшений діапазон рівнів пріоритету, а також додаткову інформацію про можливість додаткового зайняття каналу і додаткової міри захищеності.

У табл. 1.2 вказані діапазони значень деяких параметрів QoS для різних класів послуг.

Відзначимо, що деякі параметри QoS взаємно суперечливі, наприклад, затримка і рівень помилок в прийнятих пакетах, тобто, власне, надійність. Так, при передаванні голосового трафіку наскрізна затримка не повинна перевищувати 150 мс при допустимій втраті інформаційних пакетів не більше 3%.

Якщо розглядати потоковий трафік, то в цьому випадку допустимі втрати інформаційних пакетів не перевищують 1%, а для інтерактивного трафіку втрати інформаційних пакетів взагалі недопустимі — його послуги (як і послуги фоновий трафіку) передаються в режимі з підтвердженням, і

необхідність повторної передачі прийнятих з помилками пакетів не дає змогу виміряти величину затримки.

Таблиця 1.2.

## Діапазони значень параметрів QoS [54]

Параметр QoS	Голосовий клас	Потоковий клас	Інтерактивний клас	Фоновий клас
Максимальна швидкість передавання (Кбіт/с)	256 000	256 000	256 00	256 000
Гарантована швидкість передавання (Кбіт/с)	256 000	256 000	-	-
Порядок доставки	Так ні	Так ні	Так ні	Так ні
Максимальний розмір (у байтах) пакетів даних	1 500 чи 1 502	1 500 чи 1 502	1 500 чи 1 502	1 500 чи 1 502
Можливість доставки спотворених пакетів даних	Так ні	Так ні	Так ні	Так ні
Залишковий коефіцієнт помилок	$5 \cdot 10^{-2}$ , $10^{-2}$ , $5 \cdot 10^{-3}$ , $10^{-3}$ , $10^{-4}$ , $10^{-5}$ , $10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-2}$ , $10^{-2}$ , $5 \cdot 10^{-3}$ , $10^{-3}$ , $10^{-4}$ , $10^{-5}$ , $10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-3}$ , $10^{-5}$ , $6 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$ , $10^{-5}$ , $6 \cdot 10^{-8}$
Затримка передавання (мс)	100 — макс. значення	300 — макс. значення	-	-
Пріоритет в управлінні трафіком	-	-	1, 2, 3	-
Призначення / зняття пріоритету	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
Статистичний дескриптор джерела	Мовний / невідомий	Мовний / невідомий	Мовний / невідомий	Мовний / невідомий
Індикатор службової інформації	-	-	Так ні	-
Виділене призначення / зняття пріоритету: • рівень пріоритету; • переважне заняття каналу; • переважна міра захищеності	1...15 Так ні Так ні	1...15 Так ні Так ні	1...15 Так ні Так ні	1...15 Так ні Так ні

## 1.6 Зв'язок між поняттям QoS та QoE

Безпроводні мережі оцінюються критеріями KPI (key performance indicator – ключові параметри якості), які визначають ступінь задоволеності клієнтів та продуктивність оператора. Одним із важливих параметрів є якість сприйняття послуг (QoE), який використовують для опису сприйняття наданих послуг кінцевим користувачам. QoS (якість обслуговування) описує здатність мережі надавати послуги з гарантованою якістю обслуговування. Для того, щоб ефективним чином забезпечити найкращі показники QoE користувачів, мережеві та сервісні провайдери повинні належним чином керувати якістю обслуговування і наданими послугами. QoS та QoE є взаємозалежними, тому їхнє дослідження та управління повинно здійснюватися за єдиним принципом, від планування мережі до її технічної реалізації. Іншими словами, цілі мережі та послуг повинні досягати максимальних показників QoE, в той час як якість обслуговування (QoS) є основним будівельним блоком для досягнення цих показників. Проте, QoE не є обмеженим лише технічною продуктивністю мережі, є також не технічні аспекти, які впливають на загальне сприйняття сервісів користувачами.

На рис. 1.6 наведено модель відображення параметрів QoS та QoE [54, 55]. QoS визначається як здатність мережі надавати послуги на гарантованому рівні обслуговування. QoS охоплює всі функції, механізми і процедури в мережі та терміналах, що забезпечують надання узгодженої якості послуг між користувальницьким устаткуванням (UE) і базовою мережею (CN). QoE відображає практичність використання сервісів користувачами – те на скільки вони задоволені отриманими послугами, наприклад зручність у використанні, доступність, надійність та цілісність обслуговування. До цілісності обслуговуванні відносять затримку, зміну затримки (джиттер) і втрату даних під час передачі даних до користувача; доступність сервісних послуг по відношенню до недоступності, безпеку (аутентифікація, авторизація та облік),

активацію, доступ, зону дії, блокування, і час встановлення з'єднання з відповідною службою односпрямованого каналу, службу утримування цілісності, що загалом характеризують втрати з'єднання.

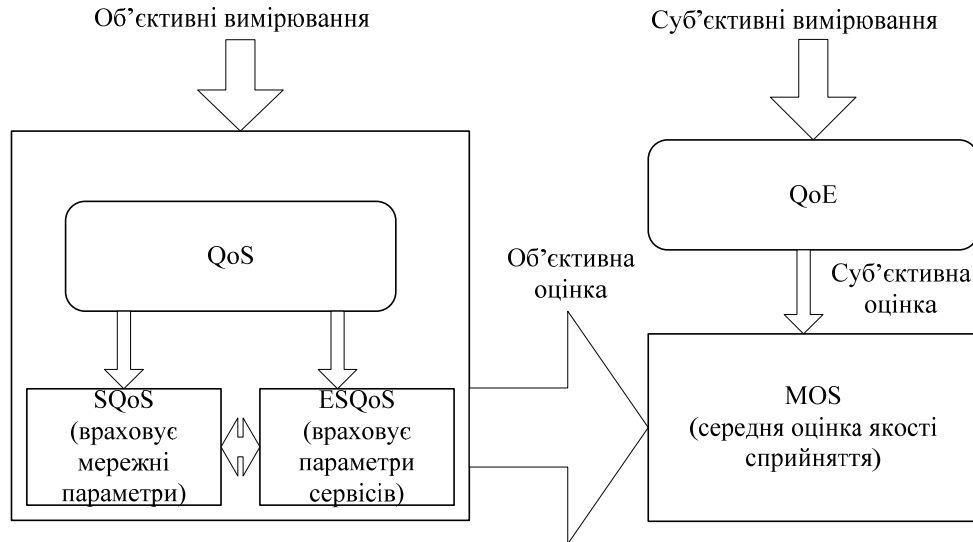


Рис. 1.6 Модель відображення параметрів QoS та QoE

Однак, у багатьох випадках кращі QoS не означають кращі QoE, і, водночас, задоволення всіх вимог QoS по трафіку не означає задоволення потреб користувачів. Відмінна пропускна здатність в одній частині мережі не завжди допоможе, якщо на невеликій відстані вже зникає покриття. Наскільки відомо, статистика по QoS дає оператору дуже мало відомостей стосовно задоволення кінцевих користувачів. Таким чином, висновок про те, що QoE покращене за допомогою механізмів QoS, які використовуються для зменшення джитера чи середньої затримки надходження пакетів не завжди є вірним. Важливим є хороший рівень QoE і метою QoS повинне бути покращення QoE.

Надання сервісу з високим QoE ґрунтується на примноженні відомостей про фактори, які головним чином впливають на користувацьке сприйняття і використанні цих відомостей для визначення операційних вимог. Підхід зверху-вниз знижує витрати на розробку і ризики відторгнення користувача та скарги шляхом забезпечення того, що пристрої або система задовільняють потреби користувачів.

## 1.7. Управління параметрами QoE та QoS

Керування параметрами QoE і QoS може бути розділене на чотири основні категорії: планування мережі, забезпечення QoS, QoE і QoS – моніторинг та оптимізація [54].

**Планування мережі.** Процес планування включає вимірювання параметрів мережі та детальне планування мережі. Вимірювання мережних параметрів (чи первинне планування) надає оцінку кількості необхідних радіо-, передавальних та центральних мережних елементів та обсяг відповідних їм інтерфейсів.

У свою чергу, їх обчислення ґрунтуються на вимогах оператора по ємності, покриттю та QoS. На етапі детального мережного планування, для кожної частини мережі та інтерфейсу між взаємодіючими елементами, виконується аналіз ємності мережі та покриття. Це вимагає врахування реальних типів трафіку, мережних топологій, а також реальних характеристик та функціоналу мережного обладнання і сигналів, які вони використовують.

**Резервування QoS.** Резервування (забезпечення) QoS є процесом впровадження QoS в мережах та мобільних терміналах. Цей процес транслює результати планування до вигляду механізмів та параметрів, придатних до використання мережними елементами та мобільними терміналами і в подальшому він налаштовує їх на обладнанні та пристроях. Забезпечення QoS розділяється на 3 категорії:

- Забезпечення QoS на рівні безпроводного доступу, рівні ядра та транспортному рівні, тобто налаштування QoS відбувається всередині мережі;
- Забезпечення QoS на сервісному рівні, де кожному сервісу ставиться у відповідність певний QoS профіль (набір атрибутів сервіс-провайдера);

- Забезпечення термінального QoS, яке надає терміналам службу інформацію додатків;

**Моніторинг QoE та QoS.** З ростом мобільних сервісів точне вимірювання QoS та QoE та їх максимально ефективно вдосконалення стало дуже актуальним для операторів, оскільки це означає збереження користувацької аудиторії та забезпечення конкурентоспроможності. Низький QoE веде до зростання кількості незадоволених користувачів, що, у свою чергу, негативно позначається на розвитку оператора в цілому.

Хоча QoE має дуже суб'єктивний характер, максимальна реалістичність стратегії його вимірювання є вкрай важливою. Спроможність вимірювати QoE дасть оператору можливість зрозуміти, наскільки вагомим є внесок, який робить мережна швидкодія на фоні загального задоволення користувачів у площинах надійності, доступності, масштабованості, швидкості, точності та ефективності. Ці елементи визначають QoE та конкурентоспроможність в просторі сучасних пакетних мереж. Враження від користування краще виражаються людськими словами, ніж чисельними величинами. Вони можуть бути відмінними, дуже добрими, добрими, задовільними та незадовільними. Існують 2 практичні підходи до вимірювання QoE:

- Підхід сервісного рівня, що використовує статистичні дані зібрані з сукупності терміналів;
- Підхід системи мережного керування (Network management system, NMS), яка використовує параметри QoS;

Перший спирається на середньостатистичну вибірку мережних користувачів для вимірювання QoE для решти користувачів. Цей процес включає:

- Визначення зважених коефіцієнтів ключових додатків;
- Ідентифікацію та зважування KPI для QoE;
- Розробку належної статистичної вибірки (географічні області, набори трафіку, час доби і т.д.) і вибір відповідного виміру KPI;

- Використання мобільних агентів в мобільних пристроях для уточнення результатів;
- Отримання загального QoE з KPI для кожного окремого сервісу та їх сукупності.

Друга методика полягає у встановленні відповідності метрикам продуктивності QoS певних метрик QoE, відчутних користувачеві. Ці виміри QoS отримані, використовуючи NMS, шляхом збору KPI з мережних елементів та їх порівняння з орієнтовними рівнями QoE. Цей процес включає:

- Ідентифікацію залежностей між KPI QoS та їх впливом на QoE;
- Вимірювання KPI QoS в мережі;
- Розрізнення користувацького QoE через виміряні KPI, використовуючи певні правила встановлення відповідностей;

**Оптимізація.** Оптимізація коміркової мережі може розглядатись як процес, спрямований на покращення загальної якості мережі, яка сприймається мобільними користувачами, і на забезпечення ефективного використання мережних ресурсів. Цей процес включає вимірювання продуктивності, аналіз результатів вимірювань і покращення мережної конфігурації згідно цих результатів. Процес оптимізації може бути задіяний з декількох причин, типовими з яких є:

- Наявність нових технологій, елементів чи функціоналу для конкретно взятої мережі;
- Зміна ситуації в інших сегментах, з якими взаємодіє мережа, що розглядається;
- Виявлення зниження QoS в певній області мережі;
- Як частина повсякденного процесу надання сервісу.

## Висновки до першого розділу

Показники якості роботи мережі характеризують її здатність забезпечувати ефективне обслуговування трафіку, яке, у свою чергу, залежить від низки суто технічних показників. Нормативне значення цих технічних показників, які характеризують можливість відмови технічних засобів, а також здатність наявного обладнання мережі обслуговувати трафік певної інтенсивності, задається на стадіях планування та проектування мережі. Як показав проведений аналіз, у процесі визначення цих нормативних показників враховуються можливі втрати оператора та споживача, пов'язані з відмовою технічних засобів, а також – з недостатньою забезпеченістю мережі ресурсами та можливостями, які зіставляються з додатковими витратами на підвищення надійності та пропускної здатності мережі.

З проведеного аналізу випливає, що існує ряд методів та засобів забезпечення якості обслуговування в мережі LTE, однак їх функціональні можливості обмежуються або радіомережею eUTRAN, або ж базовою мережею SAE. Тому актуальним науково-практичним завданням є покращення якості сприйняття послуг LTE на основі уніфікованих методів, які функціонують для одного потоку даних одночасно у радіомережі та базовій мережі.



## РОЗДІЛ 2.

# МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ, ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LTE

У даному розділі подано математичне формулювання задачі підвищення пропускної здатності системи з використанням різних видів модуляції, щоб оцінити їх вплив на результуючу ємність мережі. Є багато способів збільшення пропускної здатності, які пов'язані з експериментальними вимірюваннями. Підвищення якості сприйняття послуг (QoE), якості обслуговування (QoS), мінімізація індикатора якості каналу (CQI), використання перехідного рівня між фізичним і каналним рівнями для оптимізації планування мережі, збільшення продуктивності діаграмоутворення, використання належних способів стабілізації параметрів каналу, використання високого рівня модуляції і ефективного розподілу ресурсів. Все це сприяє підвищенню пропускної здатності. Результати розділу опубліковані у працях [1-4, 8, 11, 12, 15].

### 2.1. Підвищення пропускної здатності з використанням CQI

Дослідимо вплив параметру CQI на функціонування мережі з використанням різних видів модуляцій. Мінімізація CQI, яка досягнута шляхом вирішення оптимізаційної задачі, призводить до збільшення пропускної здатності каналу.

Базова станція LTE – Evolved NodeB (eNodeB), є основною компонентою архітектури мережі радіодоступу (RAN) LTE. Мобільний термінал зазвичай називають обладнанням користувача (UE). Функції eNodeB та UE розподілені у різних рівнях протоколів взаємодії. На рис. 2.1 зображено спрощену схему, яка показує різні рівні і потік даних по низхідному каналу [29, 31, 37, 38].

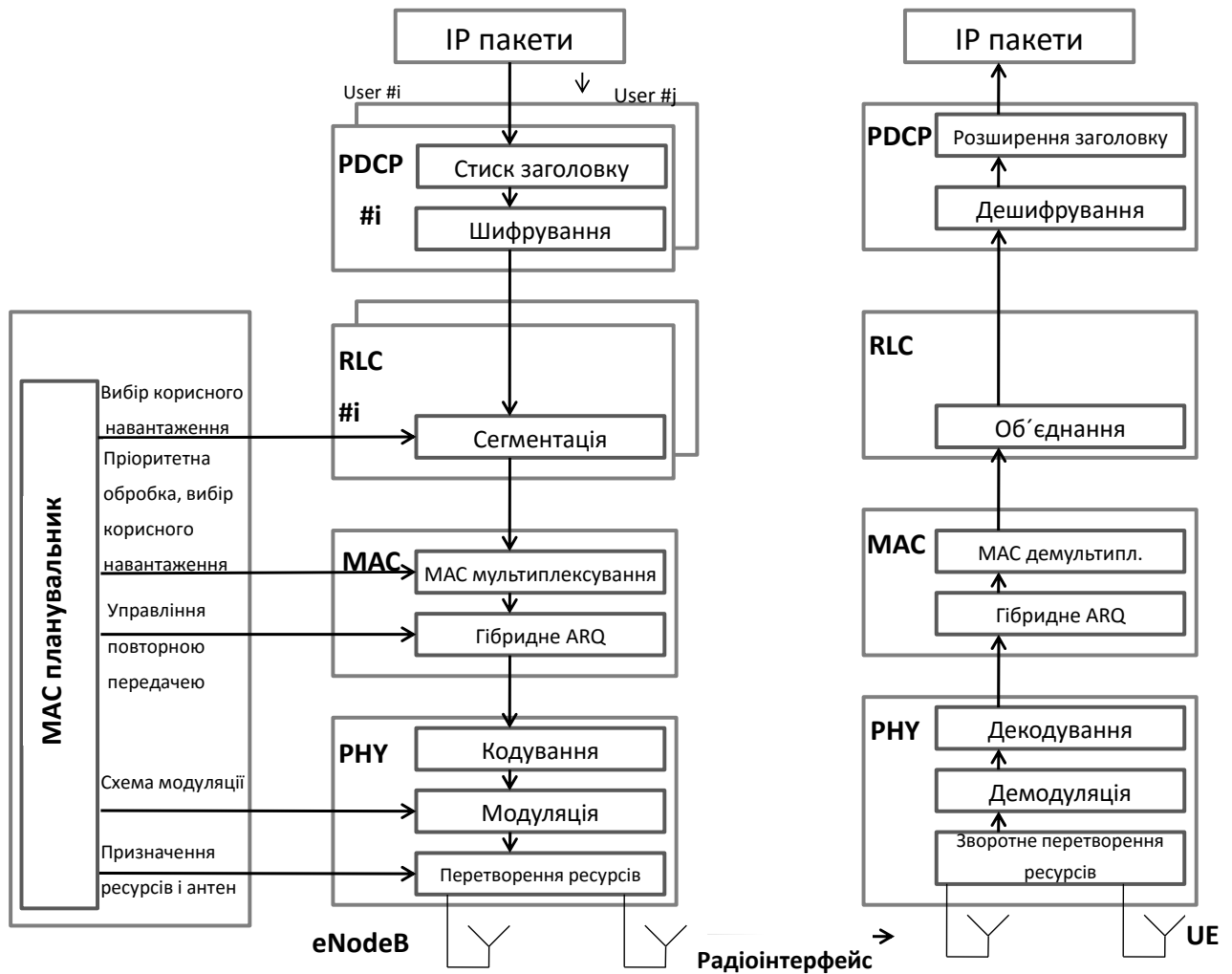


Рис. 2.1 Модель міжрівневої взаємодії в LTE

IP пакети входять в стек протоколів на рівні конвергенції протоколів пакетних даних (Packet Data Convergence Protocol (PDCP)) і потоків через стек протоколів, аж до фізичного рівня перед виходом в радіоінтерфейс. В системах коміркового зв'язку якість прийнятого сигналу UE залежить від якості каналу, який обслуговує систему зв'язку, рівня завад від інших систем, а також рівня шуму.

Для оптимізації продуктивності системи та адаптації потужності передавання передавач повинен забезпечити швидкість передачі даних до кожного користувача. Цей процес називають адаптацією каналу, яка базується на адаптивних сигнально-кодових конструкціях (Adaptive Modulation and Coding (AMC)).

### *2.1.1. Співвідношення між значеннями пропускної здатності каналу і індикатором якості каналу*

Для передачі даних в низхідному каналі LTE eNodeB зазвичай обирає сигнально-кодові конструкції (Modulation and Coding Scheme (MCS)) залежно від індикатора якості каналу (CQI) зворотного зв'язку, переданого UE у висхідному каналі. Загалом, у відповідь на зворотний зв'язок CQI eNodeB може обирати між QPSK, 16-QAM і 64-QAM модуляціями з широким діапазоном швидкостей кодування. Для передачі у висхідному каналі процес адаптації каналу є аналогічним до цього ж процесу у низхідному каналі, вибір MCS також контролює eNodeB. eNodeB може і безпосередньо винести свою оцінку швидкості передачі даних, яка підтримується у висхідному каналі. Ідентична структура кодування каналу використовується для висхідного каналу, а вид модуляції може бути обраний між QPSK і 16QAM. 64QAM не є обов'язковою для висхідного каналу (LTE-UL). Простий метод, за допомогою якого UE може обрати відповідне значення CQI, заснований на множині порогів Block Error Rate (BLER). UE відправлятиме значення CQI, що відповідатиме MCS, яка забезпечить  $BLER \leq 10\%$  для виміряного рівня потужності отриманого сигналу. Перелік сигнально-кодових конструкцій зі значенням CQI, що підтримуються стандартами 3GPP LTE, подано в табл. 2.1. Метою адаптації каналу є підлаштування розподілу ресурсів за умови, що користувач каналу підбирає параметри для передачі, такі як MCS, а також контролює управління потужністю передачі для фізичних каналів для того, щоб уникнути великих коливань якості сигналу і гарантувати необхідну якість обслуговування кожного UE. При передачі у низхідному каналі eNodeB не відомі реальні умови каналу UE, і з цієї причини він може потребувати значення CQI зворотного зв'язку від приймача, і це сприятиме у виборі відповідної MCS. Схеми модуляції, які обрані для LTE, складаються з QAM різних порядків. При використанні модуляції низького порядку eNodeB гарантує більш надійну

передачу, але нижчу швидкість. На противагу, при виборі модуляції вищого порядку, eNodeB забезпечує більш високу швидкість передачі даних, але меншу надійність. Кодова швидкість обраної MCS адаптується до умов каналу з метою підвищення надійності передачі (зменшення імовірності бітової помилки). Для передачі у висхідному каналі eNodeB регулює адаптацію каналу тим самим способом, як і у низхідному каналі, але, замість запиту на значення CQI зворотного зв'язку, він може самостійно оцінити швидкість передачі даних по висхідному каналу, яка підтримується з використанням Sounding Reference Signals (SRS). QPSK та 16-QAM можуть бути обрані як схеми модуляції і для вищої категорії UE, так, як і 64-QAM.

Таблиця 2.1

Тип модуляції та кодова швидкість для кожного CQI

CQI	Модуляція	Швидкість (x1024)	Ефективність (1/2)
1	QPSK	78	13.13
2	QPSK	120	8.53
3	QPSK	193	5.31
4	QPSK	308	3.32
5	QPSK	449	2.28
6	QPSK	602	1.70
7	16QAM	378	2.71
8	16QAM	490	2.09
9	16QAM	616	1.66
10	64QAM	466	2.20
11	64QAM	567	1.81
12	64QAM	666	1.54
13	64QAM	772	1.33
14	64QAM	873	1.17
15	64QAM	948	1.08

В LTE системі MIMO технології широко використовуються для підвищення пікової швидкості у низхідному каналі системи коміркового зв'язку, а також середньої пропускної здатності системи стільникового зв'язку. Для досягнення таких цілей, у LTE застосовуються різні системи MIMO, включаючи різні їх підвиди в режимі виділеного доступу SU-MIMO, та

множинного доступу MU-MIMO, які показано на рис. 2.2. Схема просторового рознесення каналів передавання представлена в конфігурації з двома або чотирма передавальними антенами у низхідному каналі і з двома передавальними антенами у висхідному каналі. Схема кодування із замкнутим контуром 1 рангу використовується для покращення передачі даних з використанням технології SU-MIMO на основі загального опорного сигналу системи коміркового зв'язку. Виділена схема діаграмоутворення використовується для покращення відношення сигнал/шум при демодуляції даних на основі виділеного опорного сигналу, який підтримується UE [39, 40, 75-80].

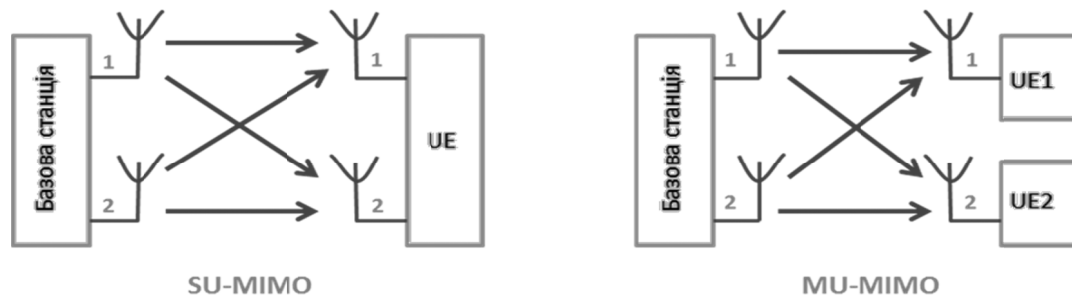


Рис. 2.2 SU-MIMO та MU-MIMO

а) Рознесення передачі [41]

SFBC з двома передавальними антенами у низхідному каналі:

$$\begin{matrix} \text{Antenna\_0} \\ \text{Antenna\_1} \end{matrix} \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Subcarrier}} \\ \begin{bmatrix} S_0 & S_1 \\ -S_1^* & S_0^* \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.1)$$

SFBC + FSTD з чотирма передавальними антенами у низхідному каналі:

$$\begin{matrix} \text{Antenna\_0} \\ \text{Antenna\_1} \\ \text{Antenna\_2} \\ \text{Antenna\_3} \end{matrix} \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Subcarrier}} \\ \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_2 & S_3 \\ -s_1^* & s_0^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -s_3^* & s_2^* \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.2)$$

Видозмінено SFBC + FSTD для PHICH з чотирма передавальними антенами у низхідному каналі:

$$\begin{aligned}
 \text{Type}_1: & \begin{matrix} \text{Antenna}_0 \\ \text{Antenna}_1 \\ \text{Antenna}_2 \\ \text{Antenna}_3 \end{matrix} \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Subcarrier}} \\ \left[ \begin{array}{cccc} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_1^* & S_0^* & -S_3^* & -S_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \left[ \begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_1^* & S_0^* & -S_3^* & -S_2^* \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \left[ \begin{array}{cccc} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_1^* & S_0^* & -S_3^* & -S_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (2.3) \\
 & \begin{matrix} \text{Antenna}_0 \\ \text{Antenna}_1 \\ \text{Antenna}_2 \\ \text{Antenna}_3 \end{matrix} \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Subcarrier}} \\ \left[ \begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_1^* & S_0^* & -S_3^* & -S_2^* \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \left[ \begin{array}{cccc} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_1^* & S_0^* & -S_3^* & -S_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \left[ \begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_1^* & S_0^* & -S_3^* & -S_2^* \end{array} \right] \end{matrix}
 \end{aligned}$$

Після того, як визначена кількість передавальних антен в eNodeB, застосовується певна схема рознесення при передачі до інших фізичних низхідних каналів. Схеми рознесення при передачі, визначені для низхідного каналу LTE, проілюстровано матрицями (2.1) – (2.3). Якщо використовується просторово-часове блокове кодування (SFBC), як показано в (2.1), eNodeB має дві антени. Для eNodeB з чотирма передавальними антенами, використовується поєднання SFBC і FSTD, як показано в (2.2), щоб забезпечити стійкість до кореляції між каналами від різних передавальних антен і для полегшення реалізації приймача UE. Схема рознесення передачі, зображена в (2.2), може бути використана для всіх низхідних каналів, окрім PUSCH. Схема рознесення передачі, показана в (2.3) використовується для цього каналу.

#### б) Відкритий контур просторового мультиплексування

eNodeB надсилає інформацію запланованій UE про те, що матриця кодування використовується в якості частини інформації управління у низхідному каналі, застосовуючи трибітове поле для двох передавальних антен та шестибітове інформаційне поле для чотирьох передавальних антен. Це інформаційне поле позначено кодуванням передавального індикатора матриці (TRMI). Для підтримки частотно-селективного кодування без надмірно високої сигналізації у низхідному каналі, TRMI також може означати, що матриця кодування, зазначена в останньому PMI від запланованого UE, використовуються для їх відповідних частотних ресурсів. Використання рознесення передачі позначається TRMI. Розімкнений контур просторового

мультиплексування може працювати, коли надійний PMI зворотного зв'язку не доступний в eNodeB, наприклад, коли швидкість UE повільна або за умови, що втрати у висхідному каналі сигналу зворотного зв'язку є занадто високими. Розімкнутий контур просторового мультиплексування з  $M$  рівнів та  $N$  передавальних антен ( $N \geq M$ ) показано на рис. 2.3. Зворотній зв'язок складається з RI і CQI в розімкнутому контурі просторового мультиплексування. На відміну від замкнутого контуру просторового мультиплексування, eNodeB визначає тільки ранг передачі та фіксований набір матриць кодування, які застосовуються циклічно через усі заплановані піднесучі в частотній області.

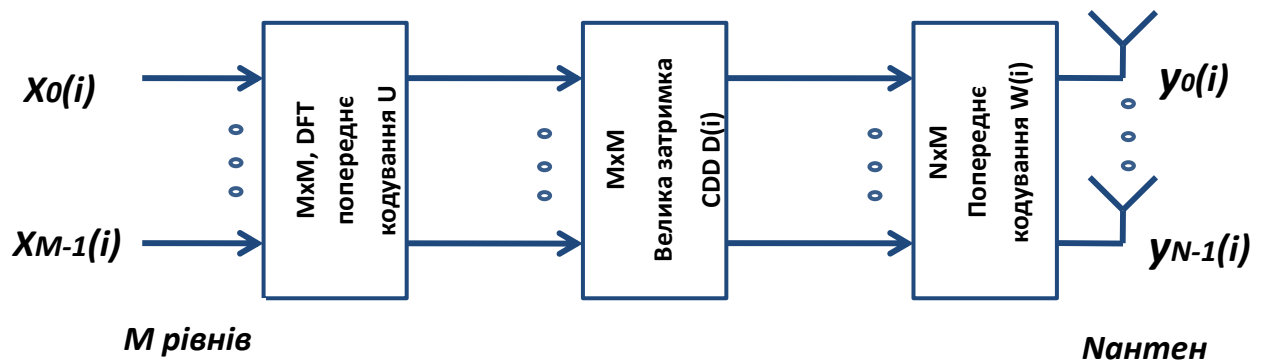


Рис. 2.3 Розімкнутий контур просторового мультиплексування з  $M$  рівнів та  $N$  передавальних антен

в) Замкнутий контур просторового мультиплексування

eNodeB застосовується для кодування переданого сигналу в просторовій області з урахуванням індикатора матриці попереднього кодування (PMI), повідомленого UE, так, що переданий сигнал відповідає просторовому каналу до відповідного UE. Замкнутий контур просторового мультиплексування з  $M$  рівнів та  $N$  передавальних антен ( $N \times M$ ) зображено на рис. 2.4. Для підтримки просторового мультиплексування в замкнутому контурі низхідного каналу, UE необхідно знати індикатор рангу (RI) зворотного зв'язку, PMI і індикатор якості каналу (CQI) у висхідному каналі. Значення (CQI) зворотного зв'язку вказує комбінацію схеми модуляції та швидкості кодування каналів, які eNodeB повинна використовувати для того, щоб ймовірність появи помилкових блоків на UE не перевищувала 10%.

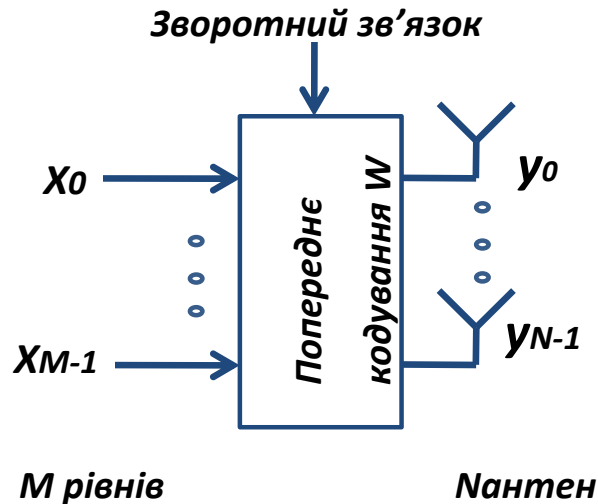


Рис. 2.4. Замкнутий контур просторового мультиплексування з  $M$  рівнів та  $N$  передавальних антен

## 2.2. Модель каналу за умови невисокої швидкості переміщення абонента (ITU Pedestrian)

Використано модель каналу для двох абонентів А та В. В кожному з цих випадків, швидкість приймається рівною 3 км/год. Кількість інтервалів для випадку пішохода А дорівнює 4, в той час як для пішохода В – 6. Середні потужності та відповідні їм затримки для інтервалів стаціонарності каналу з багатопроменевим поширенням, визначені згідно рекомендацій ITU, наведено у табл. 2.2.

В низхідному каналі LTE, якість каналу вимірюється в UE і надсилається до eNodeB у вигляді CQI (Channel Quality Indicator). Якість вимірюного сигналу залежить не тільки від каналу, шуму і рівня завад, але і від якості методів приймання. Вимірювання якості сигналу виконане з використанням опорних символів [81-84].



Таблиця 2.2.

## Модель каналу "Пішохід" ITU

Інтервал	Канал А		Канал В	
	Відносна затримка (нс)	Середня потужність (дБ)	Відносна затримка (нс)	Середня потужність (дБ)
1	0	0	0	0
2	110	-9,7	200	-0,9
3	190	-19,2	800	-4,9
4	410	-22,8	1200	-8,0
5	—	—	2300	-7,8
6	—	—	3700	-23,9

На рис. 2.5 представлена генерація сигналу на фізичному рівні LTE з турбокодуванням і модуляцією сигналів; можна побачити, які частини каналу адаптуються до системи. На фізичному рівні в LTE ресурси управляються так званим RM модулем (Resource Management), який присвоює вхідні блоки даних ресурсним блокам. Один ресурсний блок складається з 12 піднесучих і одного часового інтервалу. Управління ресурсами зображено на рис. 2.6, а значення CQI використовується для оптимального вибору ресурсного блоку, тобто оптимальної піднесучої та оптимального часового інтервалу .

Є два види звітності про CQI: періодичні та неперіодичні, де PUSCH (PhysicalUplinkControlChannel) використовується тільки для періодичної звітності CQI і PUSCH (PhysicalUplinkSharedChannel) – для неперіодичної звітності CQI [42].

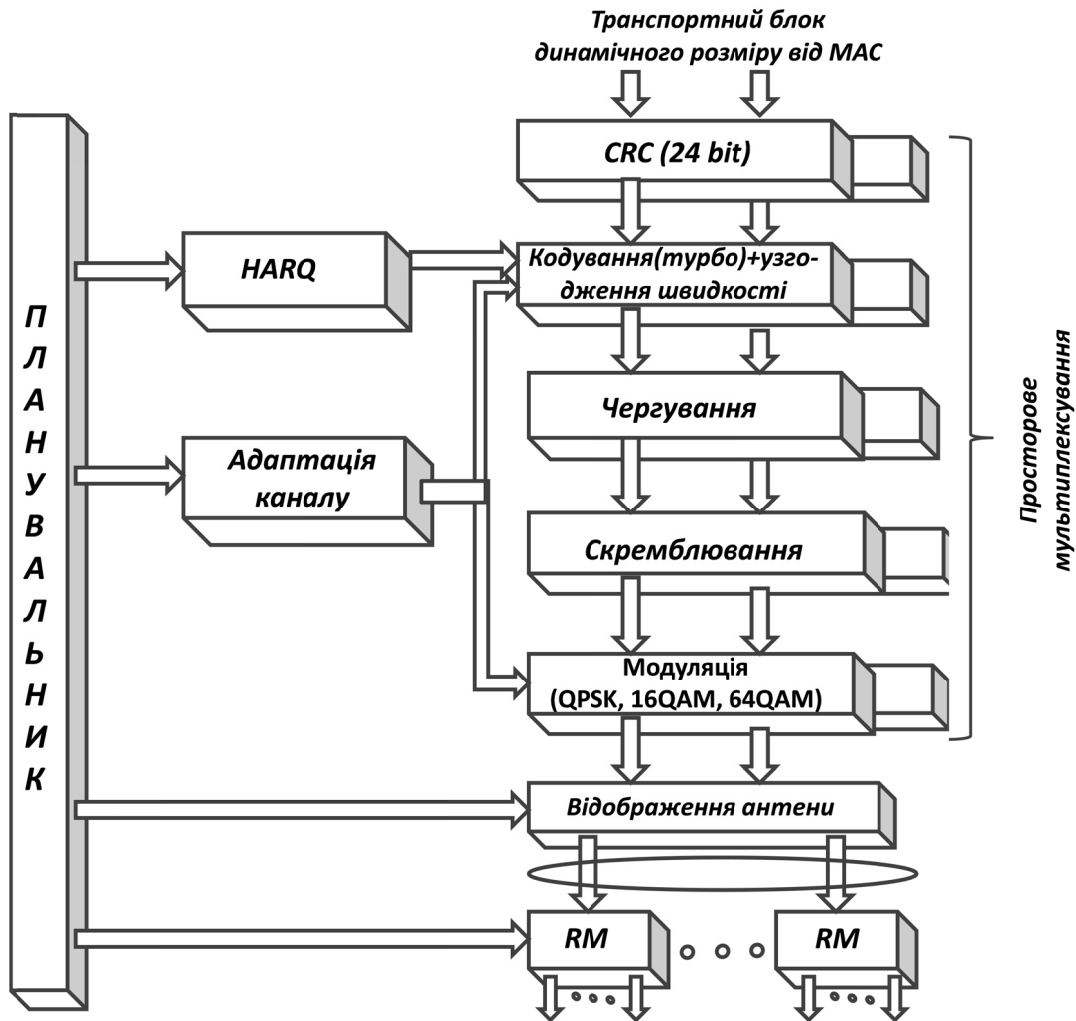


Рис. 2.5 Генерація сигналу LTE

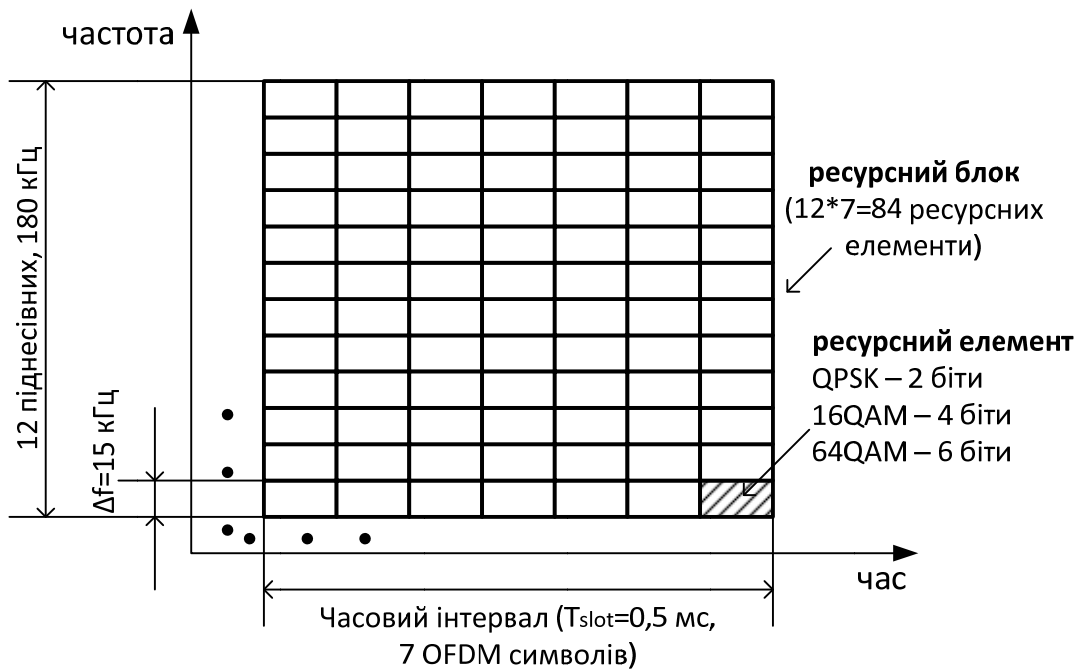


Рис. 2.6 Двовимірне управління ресурсами в LTE

UE повідомляє періодичні CQI в наперед відомі часові інтервали. Якщо eNodeB бажає отримати інформацію якості каналу в певний час, тоді спрацьовує неперіодичний CQI. Для того, щоб визначити деталізацію частоти оновлення CQI, смуга пропускання системи розділена на  $N$  піддіапазонів, кожен з яких складається з  $k$  суміжних блоків фізичних ресурсів (Physical Resource Blocks PRB). Кількість піддіапазонів  $N = N_{RB}^{DL}/K$  і визначає деталізацію частоти звітності CQI, де  $N_{RB}^{DL}$  є кількість ресурсних блоків (RB) в смузі пропускання низхідного каналу системи.

#### а) Періодична звітність CQI

Періодична звітність CQI відбувається по каналу PUSCH. Періодичний CQI може бути або широкосмуговим, або в обраному UE піддіапазоні зворотного зв'язку для всіх режимів передачі у низхідному каналі. Тип CQI вирішується eNodeB. В широкосмуговому режимі одне значення CQI вимірюється в смузі частот системи в цілому і надсилається до eNodeB. В UE обрано піддіапазон зворотного зв'язку, а загальне число піддіапазонів  $N$  в смузі пропускання системи розділено на  $J$  частин. В кожній частині смуги пропускання обрано конкретний піддіапазон, і вимірюється якість каналу в даному піддіапазоні; з цим станом смуги пропускання частина надсилається до eNodeB. У табл. 2.3 представлено розмір піддіапазону ( $k$ ) і частини смуги пропускання ( $J$ ) у порівнянні смуги пропускання системи у низхідному каналі DL-RB. Зазвичай використовуються періодичні CQI, але eNodeB також потребує неперіодичну передачу CQI зі сторони UE. Втрати при синхронізації чи хендовері – це також випадки, в яких використовуються неперіодичні CQI. Неперіодична звітність CQI проводиться по PUSCH: на прохання eNodeB встановлюється біт запиту CQI на фізичному низхідному каналі управління (Physical Downlink Control Channel (PDCCH)).

eNodeB встановлює тип CQI одним із таких способів:

- 1) Широкопосмуговий зворотний зв'язок: в цьому режимі, як в періодичній звітності, UE передає одне значення CQI смуги пропускання системи в цілому.
- 2) Налаштування піддіапазону зворотного зв'язку eNodeB: є два види CQI, які представлені в даному режимі, один для смуги пропускання в цілому і один для піддіапазонів. При розрахунку CQI піддіапазону передбачено, що передача відбувається тільки у відповідному піддіапазоні.
- 3) Піддіапазон зворотного зв'язку, обраний UE: в налаштуванні eNodeB використовується два типи CQI, одне значення CQI в широкопосмуговій системі, і одне для звітності середнього вимірюваного CQI в кожному з  $M$  обраних піддіапазонів розміру  $k$ . UE вирішує, які піддіапазони обрано. UE також надсилає положення  $M$  обраних піддіапазонів.

Таблиця. 2.3

Кількість ресурсних блоків в смузі пропускання системи в цілому  $N_{RB}^{DL}$ , кількість ресурсних блоків в піддіапазоні ( $k$ ) і частин пропускну здатності ( $J$ ) в обраних піддіапазонах UE з використанням періодичного CQI

Кількість ресурсних блоків у системі, $N_{RB}^{DL}$	Кількість ресурсних блоків у піддіапазоні, $k$	Відповідна частка пропускну здатності на піддіапазон ( $J$ )
6-7	-	-
8-10	4	1
11-26	4	2
27-63	6	3
64-110	8	4

Кількість ресурсних блоків в смузі пропускання системи в цілому, кількість ресурсних блоків в піддіапазоні ( $k$ ) і кількість піддіапазонів ( $M$ ) для обраних UE піддіапазонів звітності CQI зворотного зв'язку наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Параметри неперіодичної звітності CQI для обраних UE піддіапазонів  
зворотного зв'язку

Кількість ресурсних блоків у системі, $N_{RB}^{DL}$	Кількість ресурсних блоків у піддіапазоні, $k$	Номери найбільш підходящих піддіапазонів ( $M$ )
6-7	Лише широкосмуговий CQI	Лише широкосмуговий CQI
8-10	2	1
11-26	2	3
27-63	3	5
64-110	4	6

Пропускна здатність порівнюється з пропускнуою здатністю системи  $C$  AWGN каналу, що розрахована за допомогою формули Шеннона:

$$C = FB \log_2(1 + SNR) \quad (2.4)$$

Тут  $SNR$  – співвідношення сигнал/шум,  $B$  – ширина смуги пропускання, зайнята даними піднесучих,  $F$  – коригуючий коефіцієнт. Ширина смуги пропускання  $B$  обчислюється як:

$$B = \frac{N_{sc} \cdot N_s \cdot N_{rb}}{T_{sub}}, \quad (2.5)$$

де  $N_{sc} = 12$  – кількість піднесучих в одному RB,  $N_s$  – кількість символів OFDM в одному підкадрі (зазвичай дорівнює 14, коли встановлено нормальний циклічний префікс (CyclicPrefix CP),  $N_{rb}$  – кількість RB, яка підходить до обраної смуги пропускання системи (наприклад, 6 RB в межах смуги частот 1.4МГц системи) та  $T_{sub}$  – тривалість одного субфрейму, рівна 1мс. Передача OFDM сигналу потребує циклічного префікса CP, щоб уникнути міжсимвольної інтерференції та опорних символів для оцінки каналу. Таким чином, відома формула Шеннона, зображена в (3.4), регулюється коефіцієнтом

$F$ . Такий коефіцієнт  $F$ , що оцінює втрати в системі, розраховується за формулою:

$$F = \underbrace{\frac{T_{frame} - T_{CP}}{T_{frame}}}_{CPloss} \cdot \underbrace{\frac{N_{SC} \cdot N_S / 2 - 4}{N_{SC} \cdot N_S / 2}}_{\text{reference symbol loss}}, \quad (2.6)$$

де  $T_{frame}$  – фіксована тривалість кадру, рівна 10 ms;  $T_{CP}$  – сумарна тривалість CP для всіх символів OFDM в межах одного кадру.

### 2.3. Дослідження впливу підстроювання параметрів каналу LTE на відносну частоту бітової помилки

В системах мобільного зв'язку передача даних на високій швидкості має важливе значення для багатьох послуг, таких як відео, високоякісне аудіо та послуга мобільної цифрової інтегрованої мережі. Коли дані передаються на високій швидкості через радіоканал мобільного зв'язку, імпульсний відгук каналу може розтягнутися на багато періодів символу, що призводить до міжсимвольних перешкод (inter-symbol interference – ISI). Міжсимвольні перешкоди завжди викликають питання відновлення сигналу в безпроводному каналі. Це можна подолати з використанням еквалайзера (підстроювача). Підстроювання компенсує міжсимвольну інтерференцію (ISI), створену багатопроменевим поширенням сигналу по каналах із різною затримкою. Запропоновано декілька методів підстроювання для отримання кращих характеристик ймовірності помилки [43, 44].

#### 2.3.1. Моделювання адаптивного підстроювання параметрів каналу

OFDM є однією з перспективних технологій, спрямованих на пом'якшення ISI. Сигнал OFDM в смузі пропускання поділяється на множину вузьких підканалів, які передаються паралельно. Кожен підканал обирають досить вузьким, для того щоб відкинути вплив розкиду затримки. Об'єднавши

OFDM з CDMA, можна подолати обмеження дисперсійного завмирання середовища рухомого стільникового зв'язку та зменшити внутрішньоканальні перешкоди.

В даному розділі підстроювання параметрів каналу розглядається у випадку 2 передавальних та 2 приймальних антен ( $2 \times 2$  MIMO канал). Припустимо, що канал є багатопроменевим з гладкими Релеївськими завмираннями і модуляцією BPSK.

Кінцева мета полягає у створенні універсального особистого і мультимедійного зв'язку без урахування мобільності чи місцезнаходження з високою швидкістю передачі даних. Для досягнення такої мети необхідно підстроїти параметри каналу так, щоб компенсувати ISI:

- ✓ Підстроювання шляхом примусового подавлення – ZF;
- ✓ Підстроювання на основі мінімізації середньоквадратичної помилки (MinimumMeanSquareError– MMSE);
- ✓ Підстроювання шляхом примусового подавлення з уникненням інтерференції;
- ✓ ZF-SIC з оптимальною впорядкованістю;
- ✓ MIMO з MMSE-SIC і оптимальне впорядкування;

Підстроювання параметрів каналу зазвичай відбувається в основній смузі частот чи на передавальній частоті в приймачі. Демодульований сигнал та процес адаптивного підстроювання зазвичай реалізують в основній смузі частот з використанням комплексного представлення сигналів. У даному розділі проведено дослідження двох типів підстроювання, які використовуються в системах LTE: з примусовим подавленням (ZF) та з мінімізацією середньоквадратичної помилки (MMSE).

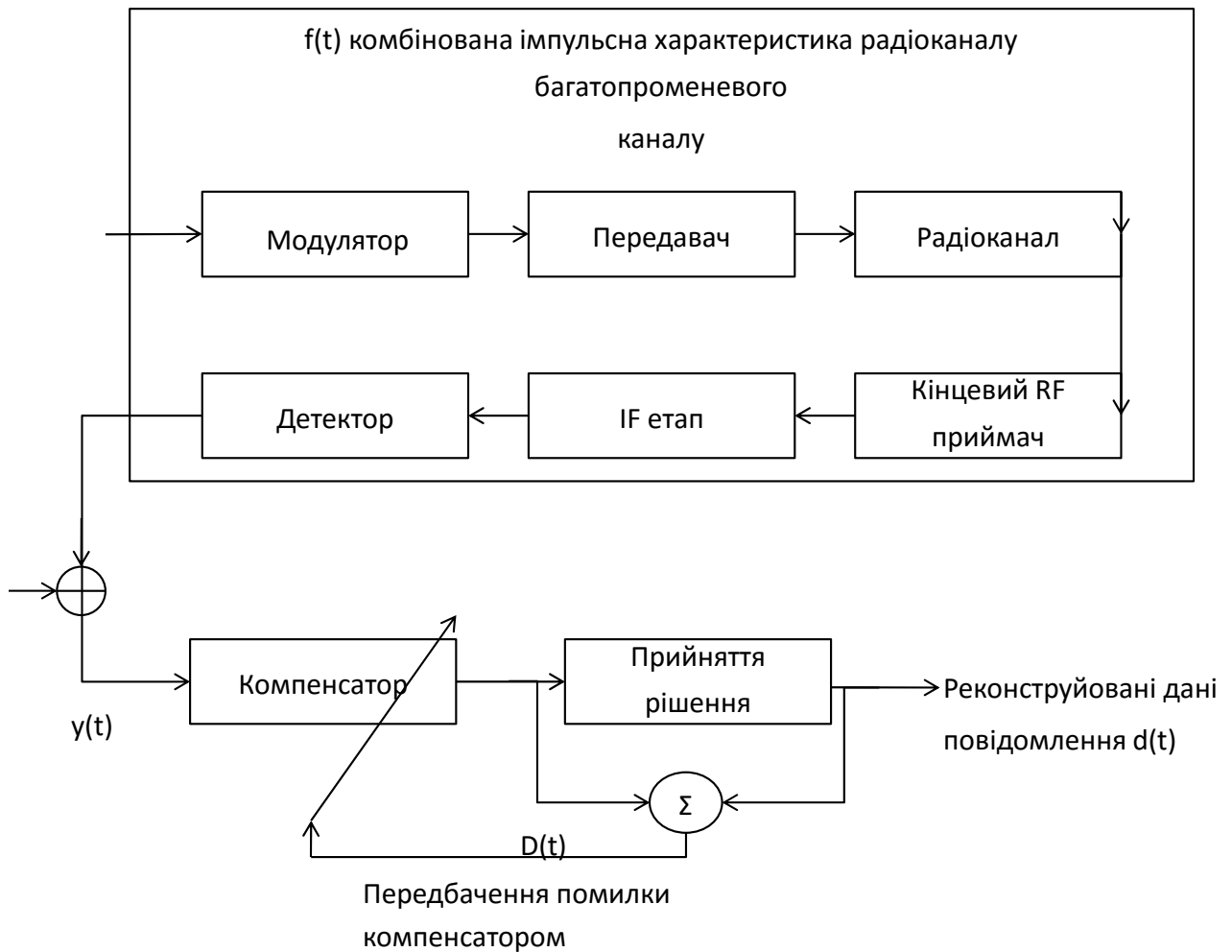


Рис. 2.7 Блок-схема системи зв'язку в приймачі з адаптивним підстроюванням параметрів каналу

На рис. 2.7 зображено блок-схему системи зв'язку в приймачі з адаптивним підстроюванням параметрів каналу. Якщо  $x(t)$  є вихідний інформаційний сигнал, і  $f(t)$  є основною смугою частоти у поєднанні з імпульсною характеристикою каналу передавача та RF/IF в секціях приймача, то сигнал, що приймається на підстроювання параметрів каналу, може бути виражений як [49-52]:

$$Y(t) = x(t) \otimes f^*(t) + n_b(t), \quad (2.7)$$

де  $f^*(t)$  позначає комплексно спряжену  $f(t)$ ,  $n_b(t)$  є шумом в основній смузі частоти на вході еквалайзера, а  $(\otimes)$  позначає операцію згортки. Якщо імпульсний відгук компенсатора є  $h_{eq}(t)$ , тоді на його виході:

$$d(t) = x(t) \otimes f^*(t) \otimes h_{eq}(t) + n_b(t) h_{eq}(t) = h(t) \otimes g(t) + n_b(t) h_{eq}(t), \quad (2.8)$$



де  $g(t)$  – комбінована реакція передавача каналу, RF/IF в секціях приймача та підстроювання параметрів каналу в приймачі. Комплексна імпульсна характеристика основної смуги частоти трансверсального фільтра еквалайзера задається:

$$h_{eq}(t) = \sum_N C_n \delta(t - nT), \quad (2.9)$$

де  $c_n$  – комплексні коефіцієнти фільтра еквалайзера. Потрібний вихід еквалайзера  $x(t)$ , що співпадає з початковими даними джерела. Припустимо, що  $n_b(t)=0$ . Тоді, щоб було  $d(t)=x(t)$ ,  $g(t)$  повинно дорівнювати:

$$g(t) = f^*(t) \otimes h_{eq}(t) = \delta(t). \quad (2.10)$$

Мета підстроювання параметрів каналу полягає у задоволенні такого рівняння:

$$H_{eq}(f)F(-f) = 1, \quad (2.11)$$

де  $H_{eq}(f)$  і  $F(f)$  – перетворення Фур'є  $h_{eq}(t)$  і  $f(t)$ , відповідно. Сукупність передавача, каналу передавання і приймача називатимемо наскрізним каналом.

### 2.3.2. Мінімізація міжсимвольної інтерференції Zero Forcing

Математичні вирази для розділення двох символів, які заважають один одному, наведено нижче. У першому часовому інтервалі на першій приймальній антені:

$$y_1 = h_{1,1}x_1 + h_{1,2}x_2 + n_1 = [h_{1,1} \ h_{1,2}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + n_1. \quad (2.12)$$

Сигнал, який приймається на другій приймальній антені:

$$y_2 = h_{2,1}x_1 + h_{2,2}x_2 + n_2 = [h_{2,1} \ h_{2,2}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + n_2, \quad (2.13)$$

де  $y_1, y_2$  – погоджені символи на першій та другій антенах відповідно;

$h_{1,1}$  – канал від 1-ої передавальної антени до 1-ої приймальної антени;

$h_{1,2}$  – канал від 2-ої передавальної антени до 1-ої приймальної антени;

$h_{2,1}$  – канал від 1-ої передавальної антени до 2-ої приймальної антени;

$h_{2,2}$  – канал від 2-ої передавальної антени до 2-ої приймальної антени;

$x_1, x_2$  – передані символи;

$n_1, n_2$  – шуми на 1-ій та 2-ій передавальних антенах.

Для зручності вищенаведене рівняння можна представити у матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Еквівалентно

$$Y = HX + N. \quad (2.15)$$

Щоб знайти  $X$ , необхідно знайти матрицю  $W$ , яка задовольняє  $WH = I$ . Модель лінійного детектора з примусовим подавленням, яка задовольняє сформульованим вище обмеженням, подана нижче:

$$W = (H^H H)^{-1} H^H. \quad (2.16)$$

Ця матриця також відома як псевдозворотна матриця *mxh*.

$$H^H H = \begin{pmatrix} h_{1,1}^* & h_{2,1}^* \\ h_{1,2}^* & h_{2,2}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

Варто відзначити, що діагональні елементи матриці  $H^H H$  відмінні від нуля. У зв'язку з цим підстроювач намагається обнулити елементи матриці, що спричиняють інтерференцію. Після здійснення такої операції може спостерігатись підсилення шуму. У зв'язку з цим підстроювання з примусовим подавленням не може вважатись оптимальним. Однак, його перевагою є простота реалізації.

Для BPSK модуляції в каналі з Релеєвськими завмираннями відносна частота появи бітових помилок визначається так:

$$P_b = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{E_b/N_0}{(E_b/N_0)+1}} \right), \quad (2.18)$$

де  $P_b$  – відносна частота появи бітових помилок;  $E_b/N_0$  – відношення сигнал/шум.

### 2.3.3. Компенсація на основі мінімізації середньоквадратичної помилки

MMSE подавляє перешкоди та компоненти шуму, тоді як приймач ZF видаляє тільки компоненти перешкод. Це означає, що середньоквадратична помилка між переданими символами та оцінка приймача зводяться до мінімуму. Отже, MMSE перевищує ZF за присутності шуму. При низькому SNR, MMSE стає узгодженим фільтром, а при високому SNR, MMSE стає ZeroForcing (ZF).

Математичні вирази для розділення двох символів, які заважають один одному, наведено нижче. У першому часовому інтервалі на першій приймальній антені:

$$y_1 = h_{1,1}x_1 + h_{1,2}x_2 + n_1 = [h_{1,1} \ h_{1,2}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + n_1. \quad (2.19)$$

Сигнал, який приймається на другій приймальній антені:

$$y_2 = h_{2,1}x_1 + h_{2,2}x_2 + n_2 = [h_{2,1} \ h_{2,2}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + n_2, \quad (2.20)$$

де  $y_1, y_2$  – погоджені символи на першій та другій антенах відповідно;

$h_{1,1}$  – канал від 1-ої передавальної антени до 1-ої приймальної антени;

$h_{1,2}$  – канал від 2-ої передавальної антени до 1-ої приймальної антени;

$h_{2,1}$  – канал від 1-ої передавальної антени до 2-ої приймальної антени;

$h_{2,2}$  – канал від 2-ої передавальної антени до 2-ої приймальної антени;

$x_1, x_2$  – передані символи;

$n_1, n_2$  – шуми на 1-ій та 2-ій передавальних антенах.

Припустимо, що приймачу відомі  $h_{11}, h_{22}, h_{12}$  і  $h_{21}$ . Також приймачу відомі  $y_1$  і  $y_2$ . Для зручності, наведені вище рівняння можна представити у матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Еквівалентно

$$Y = HX + N. \quad (2.22)$$

$$E\{[W_{y-x}][W_{y-x}]^H\}, \quad (2.23)$$

де  $W$  – матриця вирівнювання,  $H$  – матриця каналу,  $n$  – шум каналу,  $Y$  – вихідний сигнал.

Для того, щоб знайти  $x$ , необхідно знайти матрицю  $W$ , яка задовольняє  $WH = I$ . MMSE детектор, який відповідає сформульованим вище обмеженням, може бути представлений наступним співвідношенням

$$W = (H^H H + N_o I)^{-1} H^H. \quad (2.24)$$

Ефективність обох досліджених підстроювачів є співмірною. Однак, у випадку, коли елементи шуму у матриці  $H$  є нульовими, то компенсатор MMSE функціонує гірше.

#### **2.4. Дослідження впливу пропускної здатності мережі LTE на показники QoE та QoS**

Підвищення якості обслуговування QoS досягається покращенням декількох показників продуктивності мережі, які диференціюють Інтернет потоки. Якість сприйняття QoE – задоволення потреб клієнта мережевих послуг. Таким чином, показники ефективності в параметрах QoS, такі як швидкість, втрата пакетів, затримки та джитер, впливають на QoE користувача. Різні сервіси мають різний набір вимог для мережевих параметрів, таких як джитер, затримка, втрата пакетів і пропускна здатність. QoS – це здатність мережі забезпечити кілька потоків з їх конкретними вимогами. Отже, QoS потребує підтримки виділеної смуги пропускання, покращення характеристик втрат, запобігання і управління перевантаженням мережі та формування і пріоритезації потоків трафіку.

З іншої сторони, QoE забезпечує можливість кількісної оцінки рівня якості сприйняття сервісів абонентами. Це забезпечує деякі засоби для оцінки загального рівня задоволеності клієнта від наданого сервісу, а отже, і оцінки методів покращення, які можуть бути реалізовані у випадку необхідності. QoE

може означати різні речі для різних сервісів. Наприклад, аудіододаток може отримати високе значення QoE за рахунок правильності звуку, тоді як високе значення QoE для відеододатку пов'язане з великим та чітким зображенням. В цілях підтримки якості обслуговування, запропоновано різні алгоритми управління, планування, маркування і розв'язання інших задач, щоб задовольнити певні порогові значення QoS під час сеансу зв'язку. На основі QoS не можна повністю описати і задовольнити якість сприйняття користувача, що вимагає формування методу визначення QoE на основі мережевих параметрів.

При визначенні класів QoS на ІМТ-2000 заборони та обмеження радіоінтерфейсу повинні бути прийняті до уваги. Механізми QoS, передбачені в ІМТ-2000 мережі, повинні бути надійними та здатними забезпечити достатній рівень QoS. Запропоновано чотири різних класи QoS:

- Розмовний клас;
- Поточковий клас;
- Інтерактивний клас;
- Фоновий клас.

Таблиця 2.5.

## Класи QoS для ІМТ-2000

Клас трафіку	Розмовний клас Розмова в режимі реального часу	Потоковий клас В режимі реального часу	Інтерактивний клас	Фоновий клас
Основні характеристики	– Збереження співвідношення (варіації) між інформаційними частинами потоку –Розмовний шаблон (точна та низька затримка)	– Збереження співвідношення (варіації) між інформаційними частинами потоку	– Шаблон запиту відповіді – Збереження змісту корисного навантаження	– Пункт призначення не очікує даних протягом певного часу – Збереження змісту корисного навантаження
Приклад застосування	– Голос	– Потокове відео	– Перегляд веб- сторінок	– Фонове завантаження електронних листів

### 2.4.1. Підходи до оцінки якості надання послуг

Підходи до оцінки якості діляться на дві основні категорії: суб'єктивні і об'єктивні. При застосуванні суб'єктивних методів групу людей просять оцінити, як вони сприймають послугу. Об'єктивні методи базуються на використанні математичних моделей для апроксимації результатів суб'єктивної оцінки якості і поділяються на неоперативні і оперативні методи. Для застосування неоперативних методів потрібні накопичені дані, отже, хоча вони є більш точним, однак не підходять для моніторингу трафіку в реальному часі. Залежно від типу використовуваної послуги, є кілька об'єктивних підходів для оцінки сприйманого якості. До прикладів таких підходів належить E-модель представлена в Рекомендації МСЕ-Т G.107 [23] для оцінки якості сприйняття послуги VoIP, яка досліджується у роботі, MSE та PSNR для оцінки якості сприйняття відеопотоків, G-модель для оцінки якості сприйняття онлайн-ігор, а також Рекомендація МСЕ-Т G.1030 [25] для оцінки якості сприйняття веб-застосувань. Всі ці об'єктивні методи відображають якість сприйняття послуги користувачем на мережеві параметри, такі як затримка, джитер, імовірність втрати пакетів.

Суб'єктивну оцінку якості сприйняття послуг зазвичай виконують на основі шкали MOS, яка подана у таблиці 2.6. Ця шкала містить 5 категорій суб'єктивної оцінки якості сприйняття послуги. Кожен учасник тестової групи повинен класифікувати послугу за однією з категорій якості сприйняття.

Таблиця 2.6

Шкала MOS

MOS оцінка	Категорія якості сприйняття
1	Незадовільно
2	Погано
3	Задовільно
4	Добре
5	Відмінно

До недоліків суб'єктивних методів слід віднести високу вартість і організаційну складність їх застосування, а подекуди і цілковиту непридатність. Тому активно розробляються та досліджуються об'єктивні метрики якості сприйняття.

## 2.5 E-модель для оцінки якості сприйняття послуги

Застосування VoIP набирає все більш широкої популярності і використовується як альтернатива традиційної телефонії. Ця популярність пов'язана зі способом передавання даних по мережі (як правило, TCP / IP), простотою розширення спектру додаткових послуг, їх інтеграції та низької експлуатаційної вартості. До основних протоколи VoIP належать H.323, SIP, MGCP, Skype і IAX2 тощо. IAX2 є популярним протоколом, широко використовується на платформі з відкритим кодом під назвою Asterisk [53, 56].

Існують різні методи для оцінки якості сприйняття VoIP. Один з цих методів – E-модель – є об'єктивним методом.

E-модель дає змогу визначити рейтингову оцінку, що об'єднує всі параметри передавання, важливі для конкретного з'єднання VoIP. Він визначається із співвідношення:

$$R = R_o - I_s - I_d - I_{e-eff} + A \quad (2.25)$$

де

$R_o$  – визначає співвідношення сигнал/шум;

$I_s$  – визначає розсинхронізацію голосового сигналу;

$I_d$  – визначає вплив затримки;

$I_{e-eff}$  – визначає вплив низькошвидкісних кодеків;

$A$  – визначає можливу компенсацію факторів погіршення.

$$R_o = 15 - 1.5(SLR + No) \quad (2.26)$$

$$I_s = I_{otr} + I_{st} + I_q \quad (2.27)$$

$$I_d = I_{dte} + I_{dle} + I_{dd} \quad (2.28)$$

$$I_{e-eff} = I_e + (95 - I_e) \cdot \frac{P_{pl}}{\frac{P_{pl}}{BurstR} + B_{pl}} \quad (2.29)$$

Для обчислення R та його складових використаємо параметри по замовчуванню, подані у табл. 2.7.

Таблиця 2.7

## Параметри для обчислення рейтингової оцінки

Назва параметра	Значення
SLR (підсилення при надсиланні)	8 дБ
No (поріг шуму)	-64дБм
$I_{olr}$ (decrease in quality caused by too-low values of OLR)	0.440281 дБ
$I_{st}$ (вплив самопрослуховування)	0.001099
$I_q$ (вплив помилки квантування)	0.974105
$I_{dte}$ (вплив акустичного ехо на стороні розмовляючого)	0
$I_{dle}$ (вплив акустичного ехо на стороні слухаючого)	0.149046
$I_{dd}$ (вплив надмірної наскрізної затримки $T_a$ )	0
$I_e$ (вплив обладнання)	0
$P_{pl}$ (імовірність випадкової втрати пакетів)	0%
$B_{pl}$ (фактор стійкості до втрати пакетів)	4.3
BurstR (пачковість)	1

Всі згадані параметри відображено на рис. 2.8, які відповідають E-моделі.

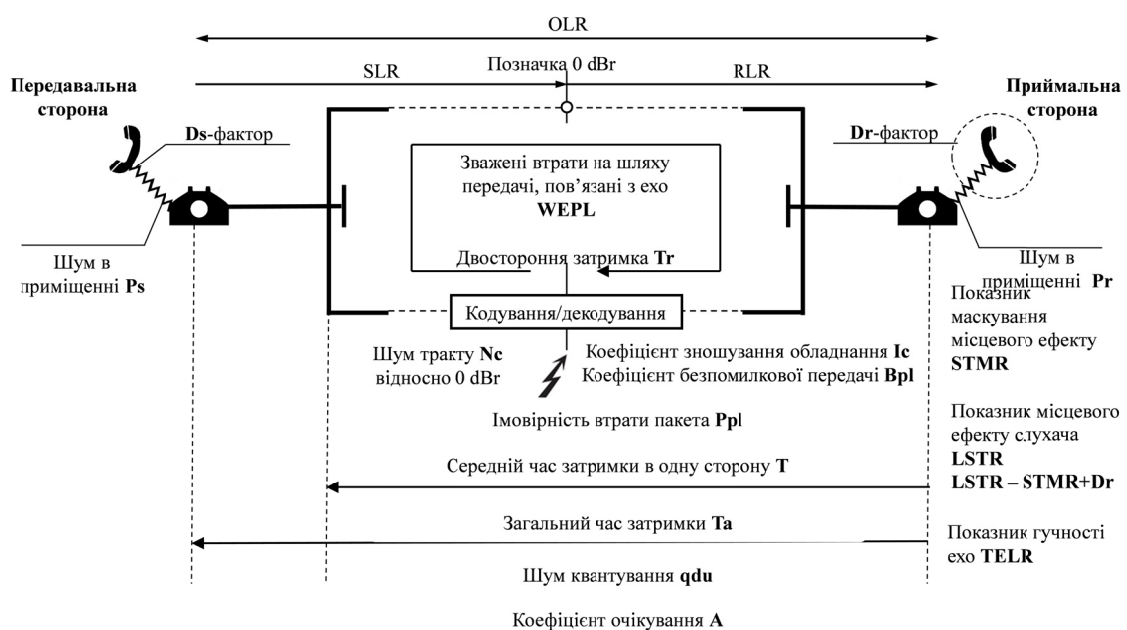


Рис. 2.8. Модель оцінки якості сприйняття телефонної розмови згідно E-моделі



Рейтингова оцінка передавання  $R$  знаходиться у межах від 0 до 100, де  $R=0$  відповідає екстримально поганій якості, а  $R=100$  – дуже високій якості. Е-модель надає статистичну оцінку якості. Оцінки класу «добре або краще» (GoB) або «погано або гірше» отримано зі статистики R-фактора на основі аналізу гаусівської функції помилок [26]

$$E(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2.30)$$

із співвідношень:

$$GoB = 100E\left(\frac{R-60}{16}\right)\% \quad (2.31)$$

$$PoW = 100E\left(\frac{45-R}{16}\right)\% \quad (2.32)$$

Рейтингова оцінка  $R$  може бути зведена до класичної суб'єктивної оцінки усередненого враження (MOS) для мовного трафіку у шкалі 1-5 із використанням співвідношення:

$$MOS = \begin{cases} 1 & \text{for } R < 0 \\ 1 + 0.035 \cdot R + R(R - 60) \cdot (100 - R) \cdot 7 \cdot 10^{-6} & \text{for } R \in [0, 100] \\ 4.5 & \text{for } R > 100 \end{cases} \quad (2.33)$$

## 2.6. Алгоритми діаграмоутворення і просторового рознесення

MIMO в системі LTE забезпечує кореляцію каналу між передавачем і приймачем, шириною більше, ніж половина смуги сигналу. Антенні елементи в передавачі розроблені і розміщені для створення високої кореляції діаграмоутворення MIMO між їхніми передавальними сигналами [45-48, 57-63].

Діаграмоутворення – це поєднання антенної техніки та цифрової техніки. При передачі  $x(n)$  по каналу  $N \times 1$ , розрахунок сигналу на приймачі  $M_i \times 1$  здійснюється за наступним рівнянням:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K w_k s_k(t), \quad (2.34)$$

де  $M_i$  – кількість антен приймача для  $i$ -того абонента.  $s_k$  – передані дані від абонента в момент часу ( $t$ ).  $w_k$  – вектор діаграмоутворення до передачі по каналу.

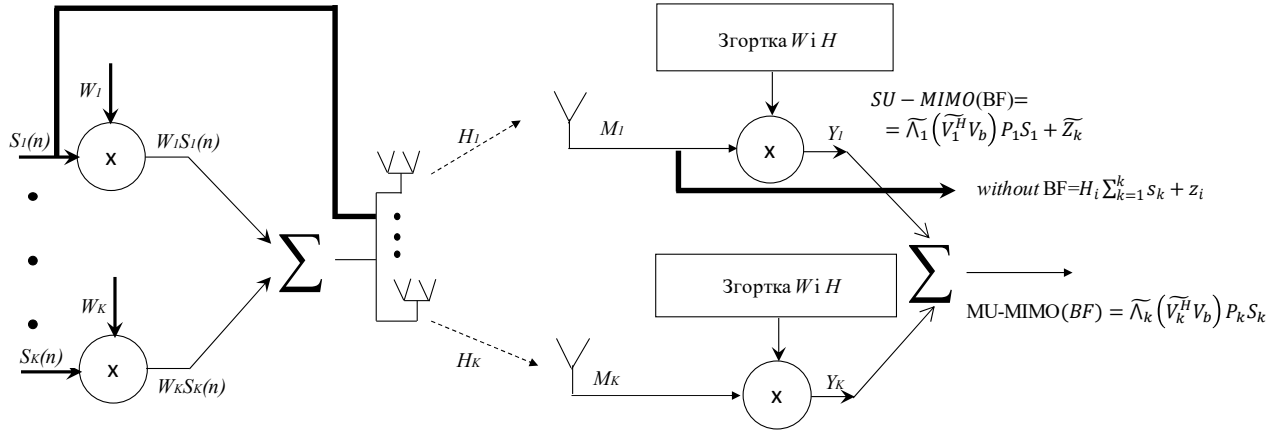


Рис. 2.9. Модель адаптивного формування діаграми спрямованості в комбінованому режимі SU/MU-MIMO

$$y(t) = H_i \sum_{k=1}^K w_k s_k(t) + z_i(t). \quad (2.35)$$

І матриця каналу  $H_i$

$$H_i = \begin{bmatrix} h_i(1,1) & \cdots & h_i(1,N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_i(M_i,1) & \cdots & h_i(M_i,N) \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Існує адитивний шум  $n$ . Відношення сигнал-шум для кожного користувача можна визначити як  $\frac{1}{\sigma_i^2}$  для оцінки каналу TDD чи FDD, де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення значень шуму.

Для одного користувача діаграмоутворення з декількома антенами приймача можна записати у вигляді наступного рівняння використовуючи (2.35):

$$y(t) = H_k x + Z_k \quad (k = 1, 2, \dots, K). \quad (2.37)$$

Використання єдиного значення для розкладу матриці каналу у рівнянні (2.37) дає:

$$H_k = U_k \Sigma_k V_k, \quad (2.38)$$

де  $U_k \in C^{r \times r}$ ,  $V_k \in C^{n \times n}$ ,  $U_k^* U_k = I$ ,  $V_k^* V_k = I$ ,  $Z$  – шум,  $C$  – канал,  $I$  – одинична матриця і  $\Sigma_k$  – матриця  $r \times n$ .

А для випадкового діаграмоутворення (RBF), рівняння (2.37) і рівняння (2.38) буде:

$$H_k = U_k \Sigma_k V_k^* V_b. \quad (2.39)$$

Для системи MIMO з виділеним каналом RBF буде:

$$y_k = U_k^H H_k V_b P_k s_k + U_k^H Z_k, \quad (2.40)$$

де  $k \in U$ ,  $P_k$  – матриця розподілу потужності,  $V_b$  – випадкова одинична матриця.

При  $H_k = U_k n_k V_k^H$  формула (2.40) набуде вигляду:

$$y_k = \Lambda_k (V_k^H V_b) P_k s_k + Z_k, \quad (2.41)$$

де  $\Lambda_k$  – діагональна матриця з SVD, і  $V_b$  – випадкова одинична матриця.

Для переходу від  $v_k$  до  $v_b$  приймач повинен компенсувати інтерференцію у зваженому векторі передавання. Передавальна антена для цього визначатиме поведінку каналу управління адаптивним формуванням та додаткового попереднього кодера, які є елементами системи SU-MIMO BF, отже рівняння (2.40, 2.41) можуть бути переписані у формі

$$\tilde{y}_k = \tilde{U}_k^H (H_k w_k) V_b P_k s_k + \tilde{U}_k^H Z_k \quad (2.42)$$

де  $w_k$  є матрицею додаткового попереднього кодування і може бути записана у вигляді

$$w_k = \begin{bmatrix} w_{k,1} & 0 \\ 0 & w_{k,2} \end{bmatrix}$$

Коли ефективна матриця каналу  $\tilde{H}_k$  рівна  $H_k w_k$  і рівна величині  $\tilde{U}_k n_k V_k^H$ , тоді формула набуде вигляду

$$\begin{aligned} \tilde{y}_k &= \tilde{U}_k^H H_k V_b P_k s_k + U_k^H Z_k \\ &= \tilde{\Lambda}_k (\tilde{V}_k^H V_b) P_k s_k + \tilde{Z}_k \end{aligned} \quad (2.43)$$

### *2.6.1. Ефективна ширина діаграми спрямованості антени базової станції LTE*

В низхідному каналі OFDM, діаграма спрямованості може бути реалізована або до, або після операції оберненого дискретного перетворення Фур'є (InverseDiscreteFourierTransform (IDFT)), тобто або в частотній, або в часовій області відповідно. Перша схема – діаграма спрямованості низхідного каналу до IDFT, а друга – діаграма спрямованості низхідного каналу після IDFT [6].

Впровадження системи діаграми спрямованості, яка відстежує кожен термінал окремо в системі OFDM, має ряд обмежень за рівнем складності. Системи FDD вимагають зворотного зв'язку, щоб отримати інформацію про канал в передавачі, і діаграму спрямованості в частотній області, коефіцієнти навантаження антени обчислюються для групи піднесучих або для кожної піднесучої, що значно складніше.

Адаптивна діаграма спрямованості підвищує рівень сигналу в певному напрямку за допомогою антенної решітки, а антени, які фізично розділені на відстань, рівну декільком довжинам хвиль, формують незалежні канали із завмираннями, котрі можуть бути використані для рознесення чи мультиплексування потоку.

Згідно рекомендацій 3GPP технологія просторового рознесення передавання використовує техніку SFBC, яка є кращою від техніки STBC, особливо для каналів із великою пропускнуою здатністю. Можна сказати, що такий спосіб передавання використовується за умови незначної зміни вимог до каналу та за низького співвідношення сигнал/шум.

Спочатку проаналізуємо питання доцільності виділення ресурсів фрейму OFDM в багатокористувацьких системах, в поєднанні з адаптивним діаграмоутворенням і просторовим рознесенням. Планувальник призначає піднесівні і символи OFDM для користувачів з урахуванням умов каналу.

У часовій області кожен символ OFDM виділяється одному користувачеві в один момент часу з часовим поділом множинного доступу (TDMA). Формувач діаграми спрямованості визначає діаграму для користувача, який активний у даний момент. У такій системі, всі піднесівні використовуються одним користувачем в заданому символі OFDM, таким чином, рекомендовано використовувати формувач діаграми на основі зворотнього перетворення Фур'є [64-68].

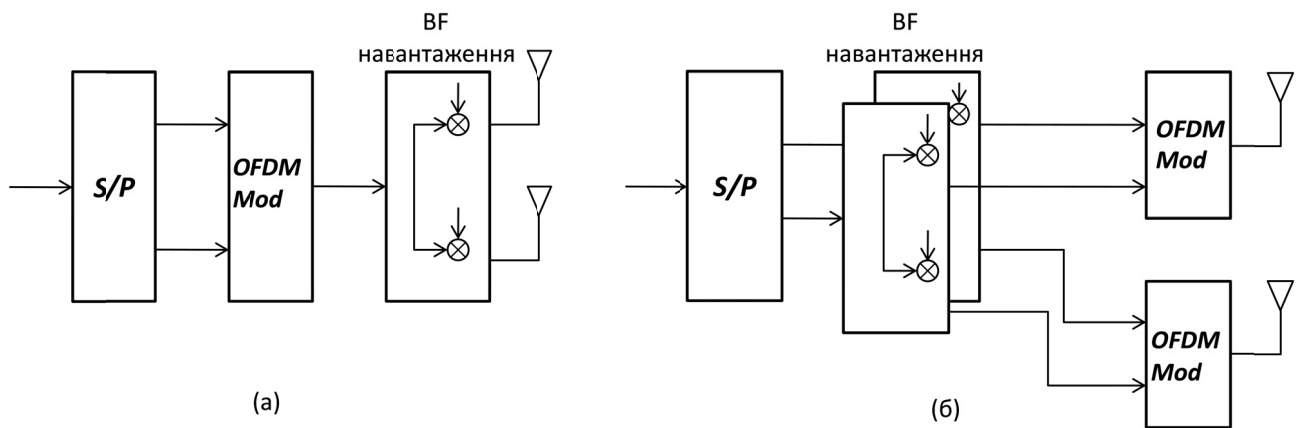


Рис. 2.10. Формування діаграми спрямованості в: а) часовій області OFDM; б) в частотній області OFDM

Рис. 2.10 (а) показує блок-схему формування діаграми спрямованості в часовій області. Після операції IDFT в передавачі, сигнал в часовій області передається через широкосмугову діаграму спрямованості. Для того щоб реалізувати просторове рознесення в системі TDMA, STBC потребує, щоб блок символів був наданий тільки одному користувачу.

Для кодів з великою надлишковістю, SFBC є більш гнучким, бо реалізований через піднесучі OFDM. В системах ортогонального частотного множинного доступу (Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)) розподіляються доступні піднесучі для користувачів в кожному символі OFDM.

Рис. 2.10 (б) показує блок-схему формування діаграми спрямованості в частотній області OFDM на піднесучих з блоками навантаження для кожної антени. Так як в OFDM кожна піднесуча використовує вузькосмуговий канал, може бути застосована вузькосмугова діаграма спрямованості. Тим не менше,

число променів діаграми спрямованості обмежено кількістю передавальних антен, які диктують ступені свободи діаграми спрямованості. Якщо велика кількість користувачів рівномірно розподілена по комірці, тоді метод діаграмоутворення не ефективний при управлінні діаграмою спрямованості до кожного користувача. Можливим рішенням є формування групи користувачів, які розміщені близько один до одного в просторі. На додаток до просторової кластеризації, алгоритм планування також може обмежувати кількість користувачів, розподілених за часовий інтервал, і відокремити розподілення в частотній та часовій областях. Базова станція направляє діаграму спрямованості, яка охоплює користувачів в даному наборі, і запобігає завадам в інших напрямках комірки.

Якщо розміщення піднесучих зберігається статично хоча б для  $T$  символів OFDM, STBC може бути реалізована для кожної вузькосмугової піднесучої. В іншому випадку, SFBC можна застосовувати, якщо користувачі розміщені суміжно піднесучим, і кількість піднесучих, призначених для одного користувача, є кратною розміру кодового блоку. Рис. 2.10 показує реалізацію STBC чи кодування SFBC в передавачі OFDM.

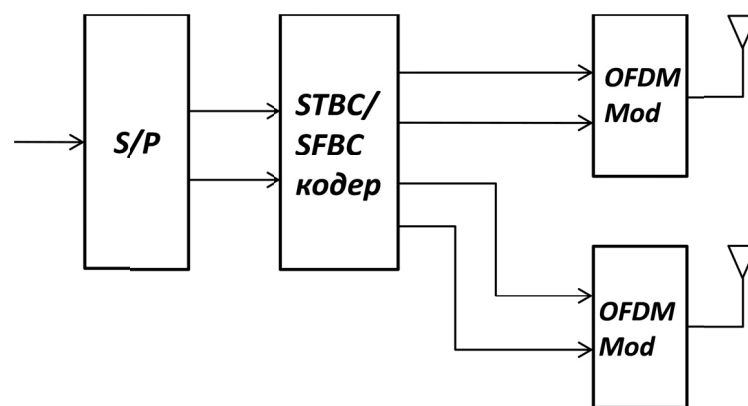


Рис. 2.11. STBC і SFBC в OFDM

Діаграма спрямованості формується антенними решітками, щоб збільшити потужність сигналу для змінних напрямків передавання, а масив елементів використовується для того, щоб сформувати діаграму спрямованості антени. Таким чином, напрямок відправлення (Direction of Departure (DoD)),

тобто напрям поширення хвилі від передавача – це і є той кут, який нас цікавить. В MIMO антенах символи даних відображаються на антенах і сигнал кожної антени налаштовано на певний коефіцієнт. В діаграмоутворенні вибір навантаження залежить від алгоритму, який використовується для оптимізації діаграми спрямованості. Значення мінімальної середньоквадратичної помилки використовується для розрахунку оптимального напрямку діаграми спрямованості, як зображено у рівнянні

$$w_{opt} = R_{yy}^{-1}r_{yd}, \quad (2.44)$$

де  $R_{yy}$  – матриця кореляції  $[Nr \times Nr]$  прийнятого сигналу,  $r_{yd}$  – взаємна кореляція між переданими даними та прийнятим сигналом.

Для розрахунку навантаження в діаграмі спрямованості необхідно знати коефіцієнти каналу. В часовому варіанті повільних завмирань, низхідний канал системи з часовим дуплексом (Time Division Duplex (TDD)) оцінюється в кадрі висхідного каналу без втрат. З іншої сторони, система частотного дуплексу потребує канал зворотного зв'язку для отримання оцінки каналу на стороні передавача, так як реакція масиву залежить від частоти.

Вимога синхронізації приймача OFDM прийнята, і навантаження формувача діаграми спрямованості розраховується на основі кадру висхідного каналу системи TDD або через затримки та без помилок каналу зворотного зв'язку в системі FDD. Розповсюдження кутової просторової кореляції є мірою кутового подавлення сигналу хвильового фронту між передавачем і приймачем.

Для формування незалежних каналів передачі, фізичне розділення між елементами антени приймається рівним п'яти довжинам хвиль  $-5\lambda$ . Велике розділення робить антенні елементи некорольованими, це реалізують на БС через зменшення обмежень на розмір. Реалізація діаграми спрямованості вимагає, щоб антенні елементи були розміщені близько, тобто фронт хвилі повинен бути узгоджений по фазі на апертурі антени. Таким чином, використовується інтервал  $\lambda/4$ , який являє собою загальне значення в межах кореляційної умови  $d < \lambda/2$ .

В широкопasmовому сигналі,  $L$  багатопроменевих сигналів відправляються з масиву різних кутів. Векторне подання сигналу є сумою всіх сигналів, сформованих вектором керування  $a(\theta_1)$ .

Просторово-часове загасання каналу моделюється з корельованим коефіцієнтом загасання  $N_t$  антенних елементів  $l$ -го інтервалу відповідно до:

$$h_l^R = R^{1/2} h_l, \quad (2.45)$$

де  $h_l$  – вектор каналу з  $N_t$  незалежними коефіцієнтами. Просторова коваріаційна матриця  $R$  задається як:

$$R = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L a^H(\theta_l) a(\theta_l), \quad (2.46)$$

$$a(\theta_l) = [1, \exp(j\alpha_l), \dots, \exp(j(N_t - 1)\alpha_l)],$$

$$\alpha_l = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_l,$$

де  $a(\theta_1)$  – вектор керування, який залежить від азимутального напрямку  $\theta_1$  першого сигналу.

Вектор керування має розмірність  $N_t$ , його елементи – комплексні числа, що відображають реакцію елементів антени на вузькосмугове джерело одиничної потужності.

Метою застосування наведених у розділі методів є визначення співвідношення імовірності бітової помилки для різних співвідношень сигнал/шум за різних конфігурацій приймально-передавального тракту з урахування адаптивного формування діаграми спрямованості антени з просторовим рознесенням та у частотній області.

## Висновки до другого розділу

У розділі представлено математичні моделі підвищення пропускної здатності безпроводного каналу LTE з використанням різних видів модуляції та швидкостей кодування, моделей каналу, видів інформування про стан каналу з



урахуванням моделі адитивного білого гаусівського шуму, що, у підсумку, дає змогу підвищити якість обслуговування.

Представлено математичні моделі адаптивної компенсації міжсимвольної інтерференції з урахуванням впливу цього процесу на пропускну здатність безпроводного каналу.

Представлено методи об'єктивної та суб'єктивної оцінки QoE та QoS з урахуванням відомих чотирьох класів якості обслуговування.

Запропоновано модель формування безпроводного каналу передавання з адаптивним діаграмоутворенням в режимі часового та частотного дуплексу для підвищення пропускну здатності для конфігурації каналу SU/MU-MIMO з використанням просторового рознесення, необхідної ширини діаграми спрямованості та декількох антен на передавальній стороні. Запропоновано математичні моделі діаграмоутворення.

Метою розділу є формування методології оцінки впливу компонентів каналу LTE на його пропускну здатність, якість обслуговування та якість сприйняття послуг на фізичному рівні та розроблення основи для удосконалення відомих методів та моделей.

## РОЗДІЛ 3.

### РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ У СИСТЕМІ LTE

Основна мета даного розділу полягає у визначенні та аналізі пропускної здатності LTE на фізичному рівні у висхідних та низхідних каналах. TDD і FDD режими розглядаються окремо. Результати розділу опубліковані у працях [1-4, 6, 7, 16-18].

#### 3.1. Особливості та параметри технології LTE-MIMO

Ресурс для передачі даних LTE складається з частот, простору і часу. Усі одиниці часу в LTE зводяться до параметра  $T_s = 1 / (15000 \times 2048)$ , в якому 2048 – довжина ШПФ. Фрейм LTE для низхідного та висхідного каналу становить  $307200 \times T_s = 10$  мс. Фрейм складається з 10 субфреймів ( $30720 \times T_s = 1$  мс) в FDD і двох півфреймів (тривалістю  $153600 \times T_s = 5$  мс) в TDD а півфрейм ділиться на чотири субфрейми і спеціальний субфрейм або п'ять субфреймів у залежності від періодичності перемикування напрямів передавання. Спеціальний субфрейм не існує в другому півфреймі. Структура кадру TDD може бути різною: існує сім різних форматів субфрейму [69-74].

Субфрейми 0 і 5, як і DwPTS зарезервовані для низхідного каналу. Субфрейм, який з'являється після спеціального субфрейму, а також UpPTS завжди призначається висхідному каналу. Кожен субфрейм і в FDD, і в TDD має два слоти тривалістю  $15360 \times T_s = 0,5$  мс. У частотній області 12 піднесівних згруповані разом і становлять ресурсний блок (RB) в одному слоті. Таким чином, ресурсний блок займає 180 кГц в частотній області і 0,5 мс в часовій області. З урахування смуги пропускання системи є від 6 до 110 RB, доступних для передачі даних. Функціонування режиму TDD забезпечує сім різних

конфігурацій субфрейму, в режимі 5 найбільш імовірно призначення субфрейму низхідному каналу. У режимі 0 – висхідному каналу. При роботі TDD для перемикавання між низхідним і висхідним каналами є захисний період в спеціальному субфреймі, що забезпечує додатковий час для висхідного каналу. У подальшому представлено більш детальне одслідження особливостей формування каналу передавання у системі LTE-MIMO.

### **3.2. Алгоритми формування пропускної здатності LTE на фізичному рівні**

На основі смуги пропускання системи, яка коливається від 1,4 до 20 МГц, доступна різна кількість фізичних ресурсів кадру. Фізичні канали та опорні сигнали розподіляються до цих ресурсів. Розрахувавши навантаження опорних сигналів, які фактично не несуть інформацію до вищих рівнів і каналів управління, які передають інформацію керування, можна визначити кількість ресурсних елементів, виділених для передачі. На основі різних схем модуляції, швидкості коду і кількості портів антени, може бути розрахована пропускна здатність для каналів передачі даних. Під час роботи TDD є сім конфігурацій для мультиплексування передачі даних в часовій області низхідного і висхідного каналів, які призводять до різних значень пропускної здатності в заданій смузі частот каналу.

Базуючись на тому, що низхідний канал – службовий канал управління, в підкадрі – 2 OFDM символи, і 0.93 – кодова швидкість, максимальна пропускна здатність низхідного та висхідного каналів 130 Мбіт/с та 40 Мбіт/с відповідно. Нижче наведено це в математичному вираженні для пропускної здатності каналу  $C$  [85, 87]:

$$C = \log_2(1 + SNR), \quad (3.1)$$

А для вираження MIMO:

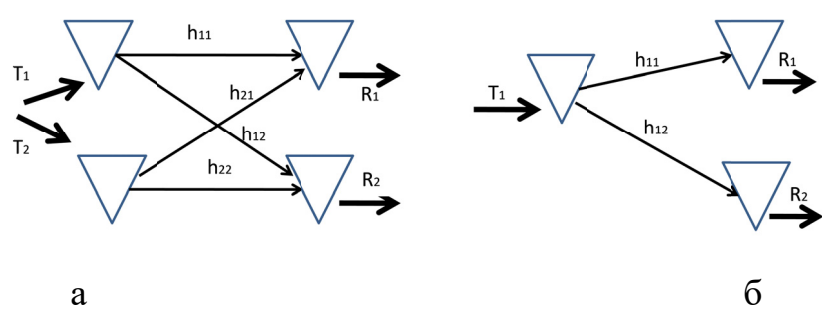
$$C = \max_{tr(R_{xx})=P_T} \log \det \left\{ I_N + \frac{1}{\sigma_n^2} H R_{xx} H^H \right\}, \quad (3.2)$$


Рис. 3.1. а) MIMO канал; б) SIMO канал

На рис. 3.1. (а) показано, як визначається розділення антени за взаємною кореляційною функцією антени з використанням моделі Джейкса. Приймальна антена також є частиною одного блоку MIMO каналу, та може бути описана як:

$$R=HS+N. \quad (3.3)$$

Це формулювання підходить для передачі та прийняття сигналів-векторів. Імпульсна характеристика каналу  $h$  тепер є у вигляді матриці  $H$ . Матриця  $H$  для багатопроменевого та каналу з ефектом Доплера матиме вигляд:

$$\begin{bmatrix} h_{11}(\tau, t) & h_{12}(\tau, t) & \dots & h_{1N_T}(\tau, t) \\ h_{21}(\tau, t) & h_{22}(\tau, t) & \dots & h_{2N_T}(\tau, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1}(\tau, t) & h_{N_R,2}(\tau, t) & \dots & h_{N_R N_T}(\tau, t) \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Кожен її елемент є функцією не тільки часу  $t$ , тому що мобільний термінал рухається, але й затримки у порівнянні з іншими каналами. Коливання вказують на відносні затримки між кожною компонентою, яка викликала порушення частоти. Часова змінна  $t$  показує, як змінюється в часі характер каналу. Якщо  $s_i(t)$  – переданий сигнал і  $r_i(t)$  – прийнятий сигнал, тоді модель загального MIMO каналу матиме вигляд:

$$r_i(t) = \sum_{-\infty}^{N_T} \int_{-\infty}^{\infty} h_{ij}(\tau, t) S_j(t - \tau) d\tau = \sum_{j=1}^{N_T} h_{ij}(\tau, t) * S_j(\tau), \quad (3.5)$$

де  $i=1,2,\dots,N_R$ .

Рівняння каналу для прийнятого сигналу  $r_i(t)$  виражається як згортка каналної матриці  $H$  і переданого сигналу через змінну затримку. Нижче наведено це у матричній формі:

$$R(t) = H(\tau, t) \otimes S(t). \quad (3.6)$$

У цьому випадку, матриця  $H$  змінюється випадковим чином в часі. Якщо зміни в часі дуже повільні (нерухомі приймач і передавач), настільки, що тривалість передавального блоку більша, ніж декількох символів, можна припустити, що цей канал буде статичним.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \dots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Тоді прийнятий сигнал може бути визначений як:

$$r(t) = H \otimes s(t). \quad (3.8)$$

Елементи матриці  $H$  можуть бути як дійсними, так і комплексними числами. Для проведення подальший досліджень слід прийняти, що матриця  $H$  є незмінною протягом тривалості одного або декількох символів, а потім змінюється випадково.

Такі швидкі зміни призводять до інтенсивних змін співвідношення сигнал/шум. Однак, припущення про стаціонарність каналу протягом певного часу дає змогу спростити декодування, бо у цьому разі декодеру не потрібно знати особливості коливання значень сигнал/шум, і канал може вважатися квазістатичним у межах тривлості блоку даних, подібно до систем з часовим розділенням каналів. Поведінка каналу є статичною щонайменше протягом тривлості блоку даних. Кожну версію матриці  $H$  називатимемо її реалізацією. Швидкість зміни цих реалізацій залежить від стану безпроводного каналу. Для визначення спектральної ефективності такої системи за умови конфігурації каналу SIMO використаємо співвідношення

$$C_{SIMO} = \log_2(1 + \|h\|^2 SNR) \text{ bits/s/Hz} \quad (3.9)$$

де  $\|h\|^2$  визначається як  $(h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_{N_R}^2)$ ;  $h$  – вектор стану просторового каналу.

З урахуванням різних моделей завад у каналі проведено моделювання для оцінки залежності спектральної ефективності безпроводного каналу від співвідношення сигнал/шум на вході приймача мобільної станції (рис. 3.2).

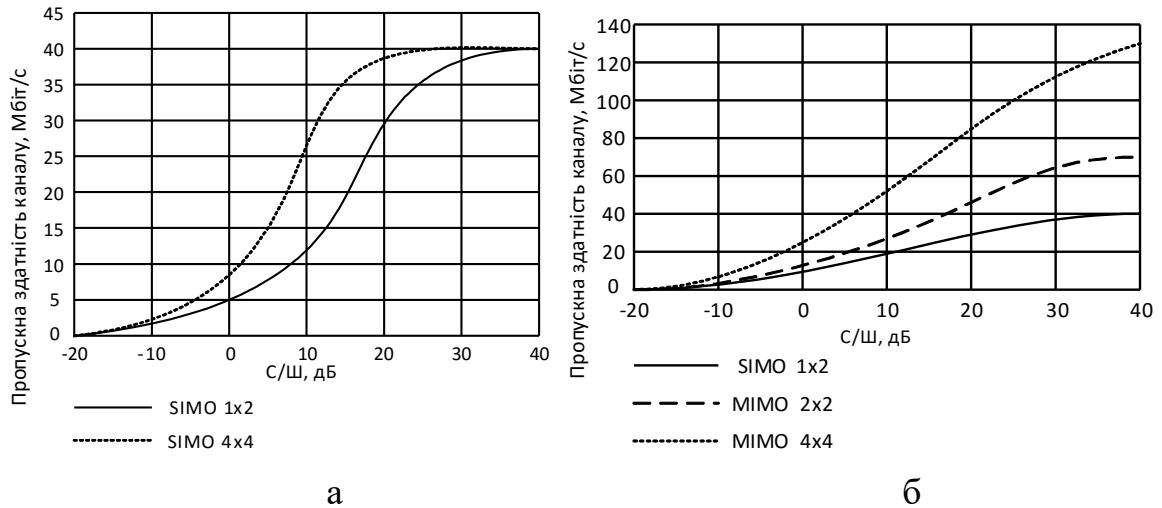


Рис 3.2. Залежність пропускної здатності каналу від співвідношення сигнал/шум на вході приймача у системі LTE для низхідного каналу (а) та висхідного каналу (б)

Канал містить  $N_R$  шляхів, а, отже, максимальний вигравш у пропускній здатності обмежується коефіцієнтом  $h^2 = N_R$  з урахуванням припущення, що передавачу не відомий стан каналу.

### 3.2.1. Формування пропускної здатності на основі вибору порту антени і кількості OFDM символів для різної смуги каналів «вгору» і «вниз»

Пропускна здатність (ПЗ) на фізичному рівні розраховується для різних сценаріїв. Для того, щоб визначити ПЗ фізичного рівня, необхідно розрахувати загальну кількість фізичних ресурсів, які доступні для різних смуг пропускання у висхідному та низхідному каналах передачі [97-100]. З іншого боку, необхідно визначити, яка кількість фізичних ресурсів пов'язана з втратами. Досяжні на фізичному рівні значення пропускної здатності 100 Мбіт/с, 150 Мбіт/с і 300 Мбіт/с для 1, 2, 4 портів антени відповідно. На підставі доступної ширини смуги пропускання системи (від 1,4 до 20 МГц), числа портів антени,

кількості OFDM символів, призначених для PDCCH(1, 2, чи 3 символів у підкадрі), кодової швидкості (0.33 – 0.92), і методу модуляції (QPSK, 16-QAM, чи 64-QAM), можуть бути отримані різні значення пропускної здатності. Для передачі по низхідному каналу, eNB визначає, яка модуляція і кодова швидкість будуть використовуватись на основі CQI, що передається від UE. eNB також може оцінити швидкість коду та схему модуляції за допомогою опорного зонduючого сигналу SRS. Отже, LTE надає перевагу техніці адаптивних модуляції та кодування AMC, яка базується на якості сигналу, певній схемі модуляції та кодовій швидкості, обраній для передачі даних. AMC є постійною для виділених для користувача ресурсних блоків; однак різні користувачі можуть мати різні модуляції та швидкості коду. Окрім того, для мультиантенної передачі, кожен просторовий канал може використовувати незалежну модуляцію і кодову швидкість. Розрахунок пропускної здатності базується на передачі по висхідному та низхідному каналах, і не включає в себе будь яку інформацію управління. PDCCH може займати 1-4 OFDM символи в низхідному каналі, отже в PDCCH службова інформація коливається від 2.3% (один OFDM символ у випадку 4-портів антени та смуги пропускання 20 МГц) до 27% (чотири OFDM символи у випадку 1-порту антени та смуги пропускання 1.4 МГц). Опорні сигнали відображаються ресурсними елементами в залежності від кількості портів антени. Для одного порту антени, опорний сигнал становить 4,7%; це навантаження зростає до 9,5% і 14% у разі двох і чотирьох портів антени, відповідно. Основний сигнал синхронізації для P-SS і S-SS можна вважати 1.4% (для смуги пропускання 1.4 МГц) і 0.085% (для смуги пропускання 20 МГц), як мінімальне та максимальне значення. Основні втрати, пов'язані з PBCCH, можуть становити 2.7% – 0.14% від пропускної здатності каналу. Слід зазначити, що для шести ресурсних блоків мінімальними і максимальними OFDM символами, зайнятими PDCCH є 2 та 4. Тим не менше, в результаті ре конфігурації PDCCH, кількість OFDM символів може бути збільшена до 6. Максимальна пропускна здатність на фізичному

рівні може бути розрахована шляхом застосування схем кодування і модуляції каналу для ресурсних елементів, доступних для передачі даних. Наприклад, максимальна пропускна здатність у випадку 1-портової антени, одного OFDM символу, призначеного для PDCCH, 64-QAM модуляції та кодової швидкості=0.85, становить 75,31 Мбіт/с. Якщо використовується антена з 2 портами, максимальна пропускна здатність досягає 144,595 Мбіт/с. Максимальна пропускна здатність для антени з 4 портами і кодовою швидкістю 0.92 досягає 299,122 Мбіт/с. Максимальна пропускна здатність у висхідному каналі може бути отримана шляхом застосування схем модуляції і каналного кодування. Наприклад, у випадку смуги пропускання системи 20 МГц, 64-QAM модуляції та кодової швидкості=0.85, максимальна пропускна здатність у висхідному каналі буде 71,97 Мбіт/с. У процесі роботи TDD існує сім різних конфігурацій для передачі даних у висхідному та низхідному каналах. Конфігурація MOD 0 організує найбільшу кількість підкадрів у висхідному каналі (в цілому шість підкадрів); однак, в MOD 5 найбільша кількість підкадрів виділяється для передачі у низхідному каналі (8 підкадрів). Максимум PDSCH та PUSCH ресурсних елементів може бути досягнуто як з MOD 5, так і з MOD 0 відповідно. Дані результати отримано з використанням поєднання технологій SU-MIMO і MU-MIMO, які представлено у другому розділі.

### **3.3. Підвищення пропускної здатності на основі узгодженого планування міжрівневої взаємодії в системі LTE з урахуванням QoS**

QoS, як правило, визначається з точки зору мінімальної швидкості чи максимальної затримки.

Параметри QoS можуть бути класифіковані відповідно до їх технічних реалізацій в системах LTE.



Така класифікація може мати ієрархічну структуру трьох різних рівнів: рівень бітів, рівень пакетів і рівень виклику. Дана класифікація називається категорією технічних параметрів QoS.

- QoS рівня бітів. Для забезпечення цілісності швидкості передачі, цільове значення BER для кожного користувача не потрібне. Досягнення необхідного SIR гарантує цільове BER для цього користувача.
- QoS рівня пакетів. У випадку даних реального часу, таких як голосова та відео конференції, які чутливі до затримки, кожен пакет повинен бути переданий в межах нормованої затримки пакета. Процедури планування можна досягти різними службами QoS, де параметри передачі визначаються відповідно до класу QoS та стану каналу.
- QoS рівня виклику. В системі стільникового зв'язку LTE, прийом виклику в системі залежить від ємності та типу виклику (новий чи хендовер).

### *3.3.1. Оцінка стану безпроводного каналу з використанням моделі ланцюга Маркова із скінченною кількістю станів*

У якості моделі SINR використаємо наступне співвідношення, яке відображає густину імовірності SINR для Релеєвського багатошляхового каналу з повільними завмираннями сигналу

$$p(\gamma_i) = 1 / \gamma_o e^{\frac{-\gamma_i}{\gamma_o}} \quad (3.10)$$

де  $\gamma_o = E\{\gamma_i\}$  - середнє значення відношення сигнал/шум.

Застосування моделі полягає у наступному: значення SINR, яке знаходиться у визначеній множині станів  $K$ , перейде у стан  $K+1$  за умови, що

безпроводний канал для активного з'єднання  $i$  перебуває у стані  $S_k$ , якщо значення  $\gamma_i$  виміряне на інтервалі  $\{T_k, T_{k+1}\}$  [86].

Припускаючи, що канал має повільні завмирання відносно зворотного зв'язку CQI повідомляють цикл і наявний ефект Доплера ( $f_d$ ) на несучій частоті ( $f_c$ ), при цьому  $f_d = v f_c / c$ , можна визначити порогові значення SINR, використовуючи імовірність перебування у стані і переходу між станами. Для практичного використання такого підходу запропоновано використовувати табл. 3.1, яка однозначно визначає порогові значення С/Ш, які відповідають значенням CQI. У випадку застосування моделі прогнозування CQI застосування даної таблиці дає змогу адаптувати метод передавання даних в каналі до його стану без необхідності опитування мобільних станцій.

З цією метою використовуємо модель ланцюга Маркова з скінченною кількістю станів.

Таблиця 3.1

Порогові значення С/Ш і відповідні їм індикатори якості каналу

<b>CQI</b>	0	1	2	3	4	5	6	7
<b>С/Ш(дБ)</b>	-500	-6.934	-5.147	-3.18	-1.254	0.61	2.70	4.697
<b>CQI</b>	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>С/Ш(дБ)</b>	6.528	8.576	10.37	12.3	14.18	15.89	17.82	19.83

Для того, щоб перейти від значення SINR до розподілу імовірностей, використано розширений експоненціальний метод (EESM)

$$\gamma_{\text{eff}} = \text{EESM}(\gamma, \beta) = -\beta \ln \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{-\gamma_i / \beta} \quad (3.11)$$

де  $\gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$  – значення SINR для кожної піднесівної, визначене для конкретного виду модуляції і кодування  $\beta$ .

Подальше дослідження цього методу буде здійснене у майбутньому. На сьогодні такий підхід успішно випробуваний для технології HS-DPA. Очікується, що його застосування буде виправдане і для LTE мережі і дасть змогу підвищити якість обслуговування абонентів за рахунок прискорення процесу адаптації методу передавання до стану каналу.

### 3.3.2. Співвідношення між С/Ш та показником CQI

У випадку, якщо умови каналу змінюються надто швидко, значення CQI, отримане базовою станцією, може не відповідати актуальному значенню С/Ш на вході приймача мобільної станції. Запропонована модель дає змогу мінімізувати вплив затримки, яка виникає при опитуванні мобільних станцій базовою.

SINR, оцінений UE із набору активних UEs можна виразити як:

$$\text{SINR}_i = \frac{\text{SF} \times I_{r,i}}{\alpha I_{\text{own},i} + I_{\text{other},i} + I_N} \quad (3.12)$$

де SF є показником розширення спектру, I – потужність сигналу на вході UE<sub>i</sub>, I<sub>own,i</sub> – загальна інтерференція в обслуговуючій комірці, I<sub>other,i</sub> – загальна інтерференція від інших комірок, I<sub>N</sub> – термальний шум, а α показник ортогональності кодів.

### 3.3.3. Модель прогнозування CQI

Показник CQI показує, який метод передавання замовляє мобільна станція. Він повинен бути таким, що відповідає поточним умовам каналу передавання. Отже, це показник відображає значення С/Ш на вході приймача мобільної станції. Отримані значення С/Ш потім можуть бути використані як вхідні дані для моделі прогнозування E-CQI з використанням ланцюга Маркова зі скінченною кількістю станів. Вона дає змогу отримати наступні значення без здійснення опитування мобільних станцій [96].

Очікування CQI засноване на побудованій моделі ланцюга Маркова безпровідного каналу. Для поточного стану CQI отримують шляхом звітування, а наступний стан  $m$  визначається найвищою імовірністю переходу:

$$P_{k,m} = \max(P_{k,k}, P_{k,k+1}, P_{k,k-1}) \quad (3.13)$$

Модель у вигляді ланцюга Маркова зі скінченною множиною станів, представлена на рис. 3.3, а, відображає поведінку Релеєвського багатопляхового каналу з повільними завмираннями сигналу у часі. Діаграма станів і переходів, яка використовується для прогнозування CQI, представлена на рис. 3.3, б.

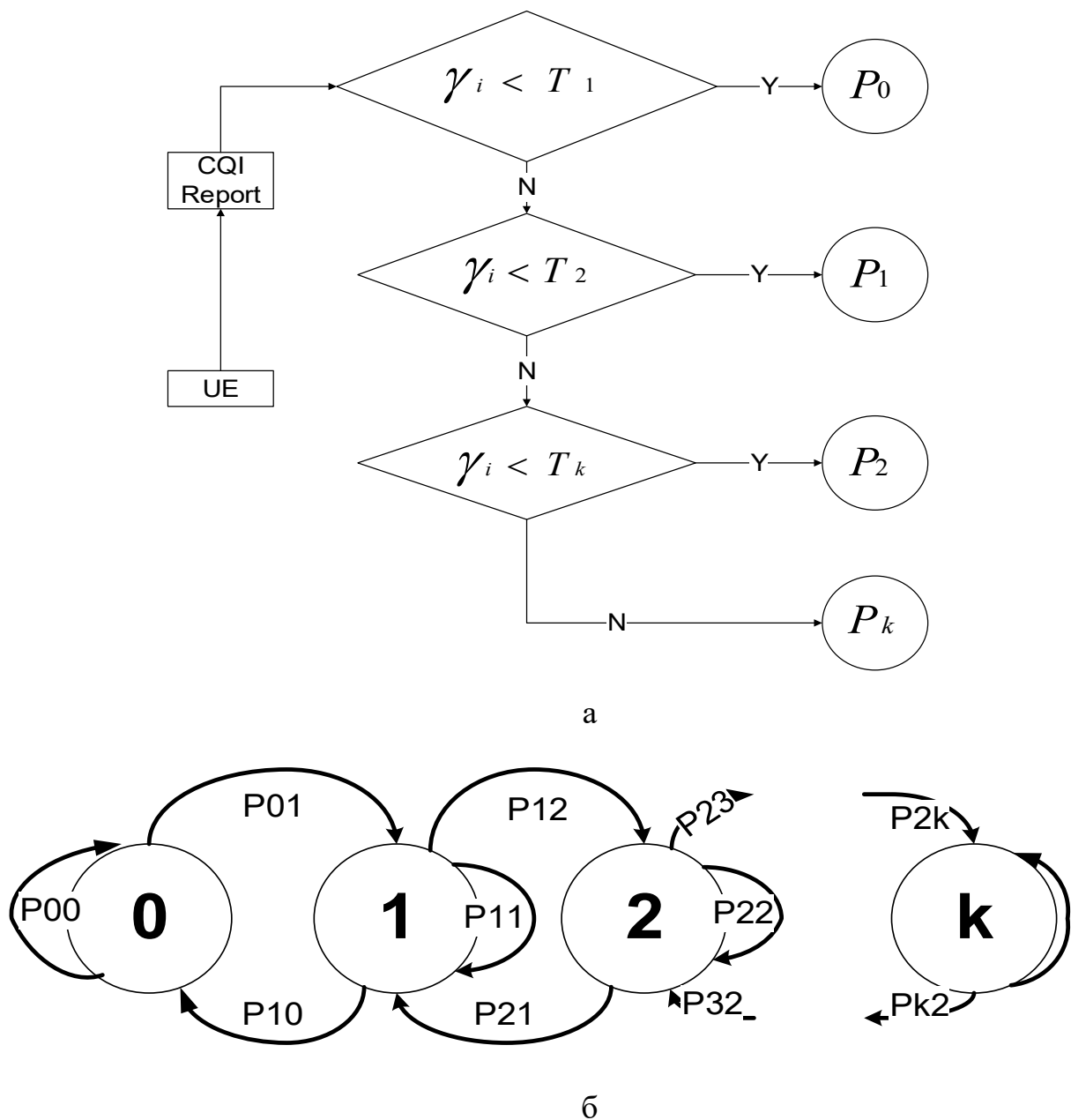


Рис. 3.3. Алгоритм (а) та модель (б) прогнозування CQI

Отже, застосування цієї моделі приводить до мінімізації тривалості адаптації каналу, а отже знижує імовірність бітової помилки та підвищує рівень якості обслуговування.

#### **3.4. Удосконалення моделі розподілу ресурсів радіоканалу LTE за рахунок введення коефіцієнта справедливості розподілу ресурсів**

Технологія LTE реалізує один з найбільш ефективних способів збільшення продуктивності і покращення якості обслуговування QoS, що досягається розвитком мережевих протоколів і механізмів, які відповідають за планування доступних мережевих ресурсів. Цей вид ресурсів, в першу чергу, включає в себе часовий ресурс – OFDM-символи – і частотний ресурс – частотні піднесучі. OFDM-символ відноситься до проміжку часу, протягом якого амплітуда і фаза модульованих піднесучих є постійними [88-95].

Запропоновано метод, покликаний забезпечити гарантовану якість обслуговування безпроводних користувачьких терміналів за допомогою виділення йому необхідної потужності в низхідному каналі. Проведено порівняльний аналіз запропонованого методу з відомими способами управління виділенням частотно-часових ресурсів в аспекті ефективності розподілу потужності низхідного каналу.

Тип розподілу ресурсів вказує спосіб, за яким планувальник виділяє ресурсні блоки для кожної передачі. З точки зору гнучкості, спосіб розподілу ресурсних блоків дає максимальну гнучкість з використанням послідовності бітового потоку, кожен біт якого представляє окремий ресурсний блок. Таким чином досягнута максимальна гнучкість, але це ускладнює процес розподілу ресурсів.

Отже, LTE використовує три різні типи розподілу ресурсів (0, 1, 2), кожен з яких використовує обумовлені процедури.

### 3.4.1. Аналіз недоліку методу розподілу ресурсів на основі максимуму відношення $C/I$

У аналізованому методі частотно-часові ресурси на інтервалі вимірювання надають станції користувача з найкращим співвідношенням сигнал/шум на вході його приймача. При цьому не забезпечується пропорційний розподіл ресурсів між іншими станціями користувачів (рис. 3.4) Отже, на інтервалі вимірювання ресурси надаються лише одній станції користувача. У випадку, коли значення співвідношенням сигнал/шум однакові на вході декількох станцій користувача, то частотно часовий ресурс буде розділено між ними рівномірно.

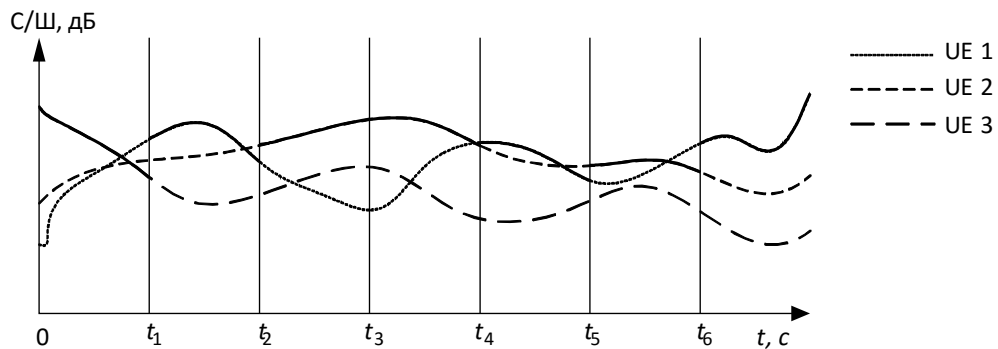


Рис. 3.4. Вимірювання значень сигнал шум у методі розподілу ресурсів на основі максимуму співвідношення  $C/I$

Однак, у випадку, коли на вході однієї станції співвідношення сигнал/шум на декількох інтервалах вимірювання найвище, то може виникнути ситуація захоплення ресурсів, як показано на рис. 3.5.

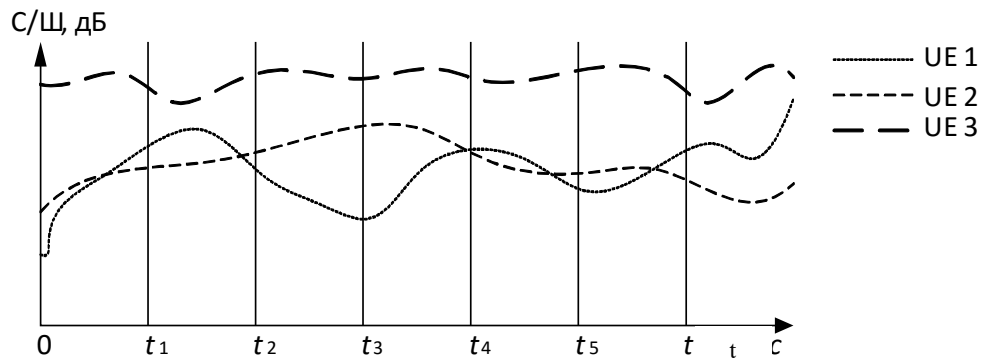


Рис. 3.5. Недолік методу розподілу ресурсів на основі максимуму відношення  $C/I$

### *3.4.2. Особливості обміну керуючою інформацією в технології LTE для надання ресурсів абонентським терміналам*

З метою керування параметрами низхідного каналу у технології LTE застосовуються різні формати керуючої інформації про його стан. Ця інформація передається у каналі PDCCH. Форматом визначається, яким чином інформація пакується в пакети та передається по низхідному каналу передавання даних. Формат вказує станції користувача, яким чином будуть передані дані: кількість ресурсних блоків, сигнально-кодову конструкцію, спосіб розподілу ресурсів, надлишковість транспортного блоку. Кожен формат DCI супроводжується контрольною сумою, яка додатково шифрується, що дає змогу однозначно визначити канал PDSCH, для якого цей формат визначений. Отже, лише станція користувача, яка зможе розшифрувати формат DCI, отримає відповідні дані.

У дисертаційній роботі використовується DCI формат 1, що дає змогу надати єдиний транспортний блок з використанням нульового та першого типів розподілу ресурсів LTE.

DCI формат 1 містить ряд полів, які відіграють значну роль у можливості реалізації запропонованого методу розподілу ресурсів.

1. Заголовок типу розподілу ресурсів – визначає тип розподілу ресурсів. Це поле є однобітовим, оскільки доступно лише два можливих типи розподілу ресурсів. Обидва вони базуються на використанні бітових послідовностей для позначення окремого ресурсного блоку або їх групи.
2. Поле прив'язки ресурсних блоків – це багатобітове поле змінної довжини, яке дає змогу станції користувача трактувати розподіл ресурсів нульового чи першого типу каналу PDSCH.

Номери бітів для нульового та першого типу розподілу ресурсів у всіх смугах каналів дають змогу інтерпретувати обсяг наданих ресурсів (табл. 3.2).

Тип розподілу ресурсів 0 – це найпростіший спосіб розподілу ресурсів. Він поділяє ресурсні блоки на кратну кількість груп. Така група ресурсного блоку називається RBG(ResourceBlockGroup). Кількість ресурсних блоків у кожній групі варіюється залежно від смуги пропускання системи. Це означає, що розмір RBG відрізняється в залежності від смуги пропускання системи. Тип розподілу ресурсів 0 розподіляє ресурси з використанням груп ресурсних блоків, де кожен біт являє один RBG.

Таблиця 3.2

Кількість бітів надання ресурсів з використанням різних типів розподілу ресурсів та її зв'язок з кількістю сформованих ресурсних блоків та розміром їх груп

Ширина смуги пропускання, МГц	Номери бітів надання ресурсів (тип 0)	Номери бітів надання ресурсів (тип 1)	Кількість сформованих ресурсних блоків, $N_{RB}^{DL}$	Розмір групи ресурсних блоків
1,4	6	5	$\leq 10$	1
3	6	4	11-26	2
5	13	11	11-26	2
10	17	14	27-63	3
15	19	16	64-110	4
20	28	25	64-110	4

Ієрархія даних у цьому типі є "RB -> RGB", а розподіл ресурсів здійснюється на рівні RBG. Нижче зображено тип розподілу ресурсів 0 для смуги пропускання 10 МГц.



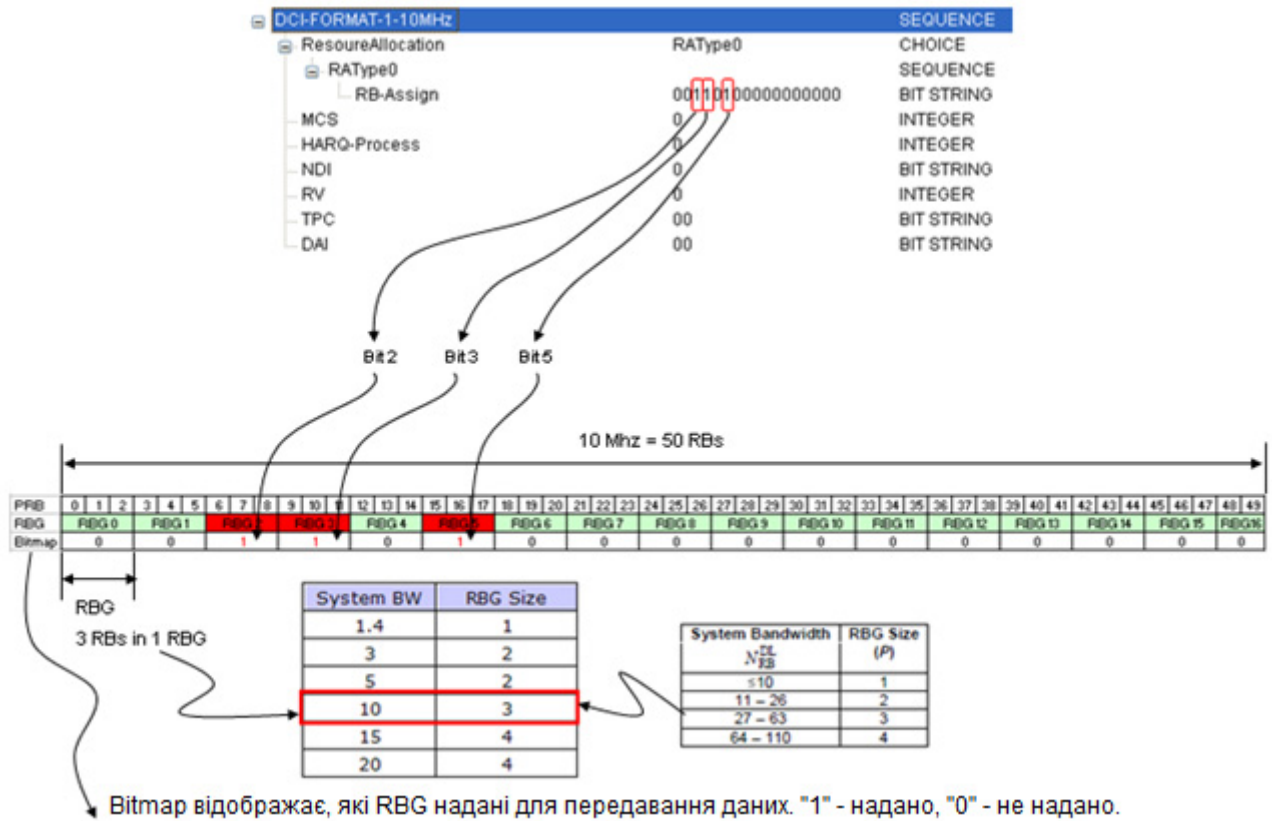


Рис. 3.6. Принцип функціонування нульового типу розподілу ресурсів

### 3.4.3. Методика надання ресурсних блоків для максимізації пропускної здатності

Для розуміння особливостей призначення пропускної здатності в низхідному напрямку передавання в технології LTE спочатку слід дослідити розподіл груп ресурсних блоків [101].

На рис. 3.8 представлено блок-схему послідовності операцій запропонованого методу розподілу ресурсних блоків за мобільними абонентськими станціями. Цей метод дає змогу призначити пропускну здатність всім мобільним станціям у комірці. Для оцінки його ефективності проведено порівняння його із відомим методом максимізації співвідношення С/І.

Запропонований метод оперує наступними величинами:

- 1)  $N$  – загальна кількість UE в мережі;

- 2)  $K$  – кількість SB, утворених при передачі одного підкадру. У технології LTE, кількість SB залежить від смуги пропускання каналу і може приймати значення: 6, 15, 25, 50, 75, 100;
- 3)  $R_{\text{необ}}^n$  – необхідна пропускна здатність для обслуговування  $n$ -ого UE (Мбіт/с);
- 4)  $R_c^n$  – кодова швидкість, яка використовується при кодуванні сигналу  $n$ -ого UE;
- 5)  $k_b^n$  – біт навантаження  $n$ -ого символу UE;
- 6)  $K_s$  – кількість піднесучих для передачі даних в один RB і один SB. Цей параметр залежить від частотного рознесення  $\Delta f$  між піднесучими і повинен задовольняти умову  $K_s \Delta f = 180$  кГц.  $K_s$  може приймати значення від 12 до 24, що відповідає частотному поділу між піднесучими  $\Delta f$ , і дорівнює 15 кГц і 7.5 кГц;
- 7)  $N_{\text{symp}}^{RB}$  – кількість символів, що утворюють один ресурсний блок. Параметр  $N_{\text{symp}}^{RB} = 7$  при використанні звичайного циклічного префікса (cyclic prefix CP). Тривалість нормального CP для першого OFDM символу –  $T_{CP}^1 = 5.2$  мкс, а для 2–6 OFDM символів –  $T_{CP}^{2-6} = 4.2$  мкс. При використанні розширеного CP ( $T_{CP} = 16.7$  мкс), RB складається з шести OFDM символів ( $N_{\text{symp}}^{RB} = 6$ );
- 8)  $T_{SF} = 1$ мс – час передачі одного підкадру;
- 9)  $N_{SF}^{RB} = 2$  – кількість RB, сформованих на тій же піднесучій і розподілених при передачі одного підкадру на UE.

При розробці методу важливо забезпечити правильний запис особливостей побудови OFDMA кадру, який формується в режимі TDD (Time-division duplexing) і FDD (Frequency-division duplexing). У режимі TDD і FDD, кожен кадр розділений на десять підкадрів. У режимі FDD, кожен підкадр низхідного каналу повинен передавати інформацію в напрямку каналу «вниз». При використанні режиму FDD, число підкадрів у низхідному каналі дорівнює

загальній кількості підкадрів в кадрі і становить  $N_{SF} = 10$ . У режимі TDD, кількість підкадрів у низхідному каналі може бути різною, це залежить від конфігурації, яку використовує кадр. З точки зору розробленого методу, обраний режим FDD використовує всі підкадри для передачі даних в напрямку низхідного каналу [101-103].

Відповідно до даних, які наведені в табл. 3.2, кількість груп ресурсних блоків, які можуть бути розподілені між абонентськими станціями в межах одного підкадру.

На рис. 3.7 зображено блок-схему послідовності операцій запропонованого методу розділення ресурсних блоків в групі, що забезпечує розподіл пропускної здатності для всіх абонентських станцій.

Робота методу може бути описана кількома етапами, які були використані у блок-схемі на рис. 3.7.

Етап 1. Алгоритм починає роботу з блоку 1, де збирають дані про стан мережі і в блоці 2 в формі множини представляють параметри низхідного напрямку передавання. Коли мобільним станціям не виділяються ресурси, немає передавання даних і швидкість передавання даних дорівнює нулю (блок 3). Далі застосовуються два способи розподілу ресурсів: за максимізацією сумарної швидкості передавання і запропонований метод розподілу (блок 4).

#### А) Запропонований метод

Етап 2. Розглянемо перший субфрейм (блок 5) і першу групу ресурсних блоків (блок 6). Алгоритм здійснює розподіл ресурсів для мобільних станцій з використанням змінних  $W$  і  $q$ . Змінна  $W$  визначається з пропускної здатності, виділеної для першого субфрейму ( $W = R_1 / R_{req} \wedge 1$ ). У той же час, змінна  $q$  приймає значення 1 відповідно до перевірки першого UE (блок 7).

Етап 3. У подальшому обираємо UE і призначаємо їй групу RGB, яка визначена в 2 етапі. Такий вибір здійснюється з використанням постійної нумерації UE (блок 8) та порівнюючи значення наданої пропускної здатності із необхідною (блок 9). Якщо розрахункове значення  $W$  більше, ніж у заданому

співвідношенні, то змінні  $W$  і  $q$  приймають значення, які стосуються поточного UE (блок 10). Якщо відношення пропускної здатності, наданої для UE, до необхідної пропускної здатності більше або дорівнює  $W$ , змінні  $W$  і  $q$  не міняють своїх значень, і алгоритм переходить на наступний UE (блок 8).

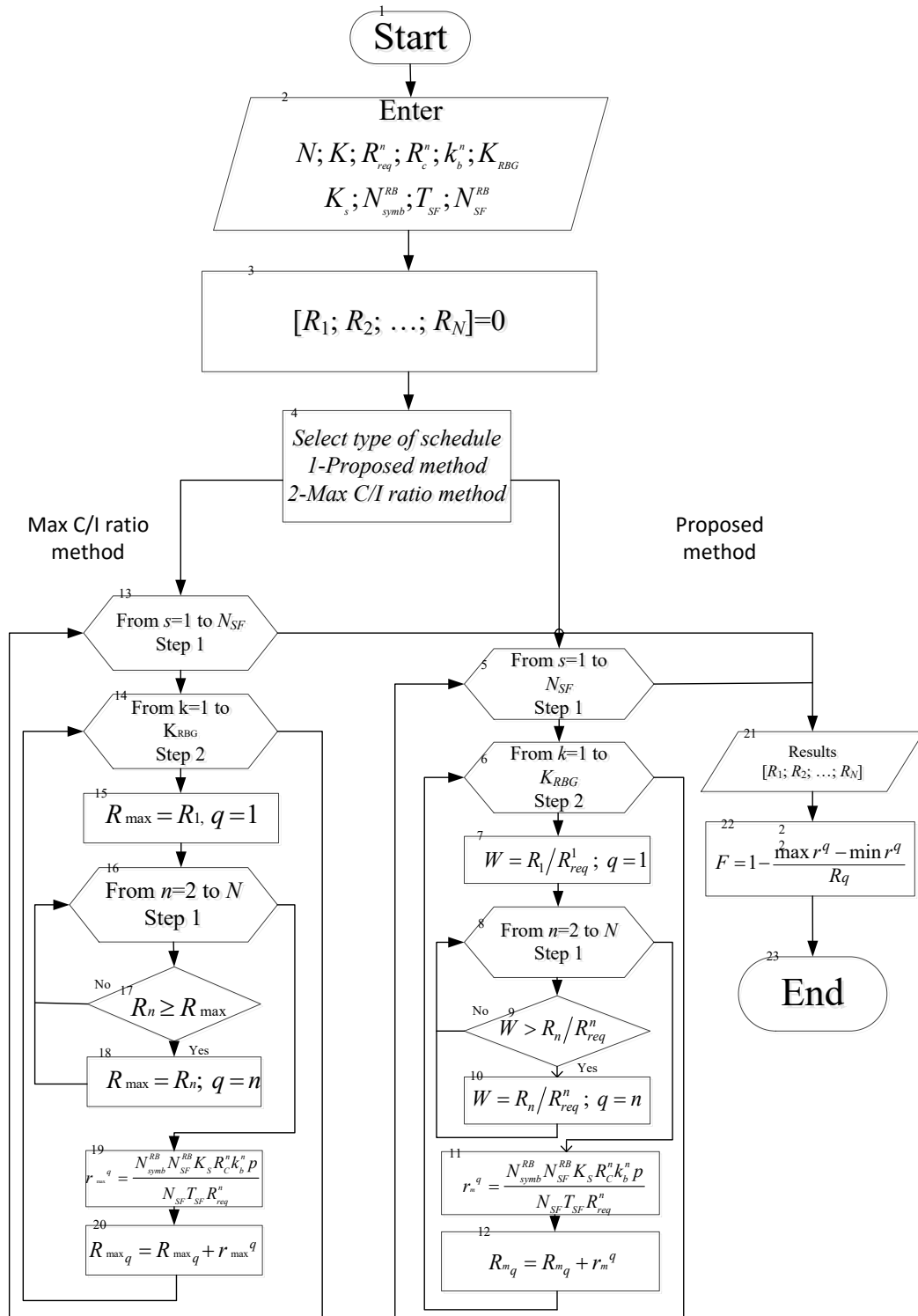


Рис. 3.7. Блок-схема запропонованого методу

Етап 4. Після перевірки всіх UE, розраховується значення пропускної здатності (блок 11) відповідно до обраної RBG, після чого це значення додається до пропускної здатності попередньо виділеної групи (блок 12). Етапи 2-4 необхідно повторити для всіх субфреймів і груп ресурсних блоків.

Б) Метод розподілу за максимумом співвідношення С/І

Етап 5. Цей тип розподілу представлений блоками 13-20. Він відрізняється від запропонованого у блоці 15, де приймається, що перший користувач має найбільше співвідношення сигнал/шум, і у подальшому це значення порівнюють з іншими користувачами, як показано в блоках (17-18).

Етап 6. Кожній UE надається необхідний набір груп ресурсних блоків, що відповідає розподілу пропускної здатності у низхідному напрямку передавання (блок 21).

Етап 7. Розраховується показник справедливості розподілу між користувачами для кожного типу розподілу (блок 22), і виконання алгоритму припиняється (блок 23).

Оцінка справедливості розподілу ресурсів здійснена у відповідності до співвідношення

$$F^i = 1 - \frac{\max_n R_n^i - \min_n R_n^i}{\sum_{n=1}^N R_n^i}, \quad (3.14)$$

де  $R_n^i$  – пропускна здатність, призначена  $n$ -ому UE на  $i$ -ому інтервалі вимірювання,  $n = \overline{1, N}$ .

Можливості надної пропускної здатності можуть бути відображені у вигляді імовірності того, що надана пропускна здатність задовільняє вимоги конкретного UE.

Така імовірність на  $i$ -ому інтервалі вимірювання визначена на основі співвідношення

$$P^i = \frac{\sum_{n=1}^N Q_n^i}{N} \quad (3.15)$$

де  $Q_n^i$  – змінна, яка визначає, чи була забезпечена запитана пропускна здатність

на  $i$ -ому інтервалі вимірювання, тобто  $Q_n^i = \begin{cases} 0, & \text{if } R_n^i < R_{req}^i \\ 1, & \text{if } R_n^i \geq R_{req}^i \end{cases}$ .

### 3.4.4. Удосконалений метод розподілу ресурсів радіоканалу LTE першого типу за рахунок формування віконного механізму групування абонентів за значенням співвідношення сигнал/шум

У запропонованій моделі розподіл частотних-часових ресурсів в низхідному каналі LTE здійснюється відповідно до методу максимального відношення С/І та формулюється як задача розподілу ресурсних блоків, які належать однойменній підмножині, певному мобільному терміналу за значенням С/Ш на його вході. На рис. 3.8 представлено блок-схему запропонованої моделі.

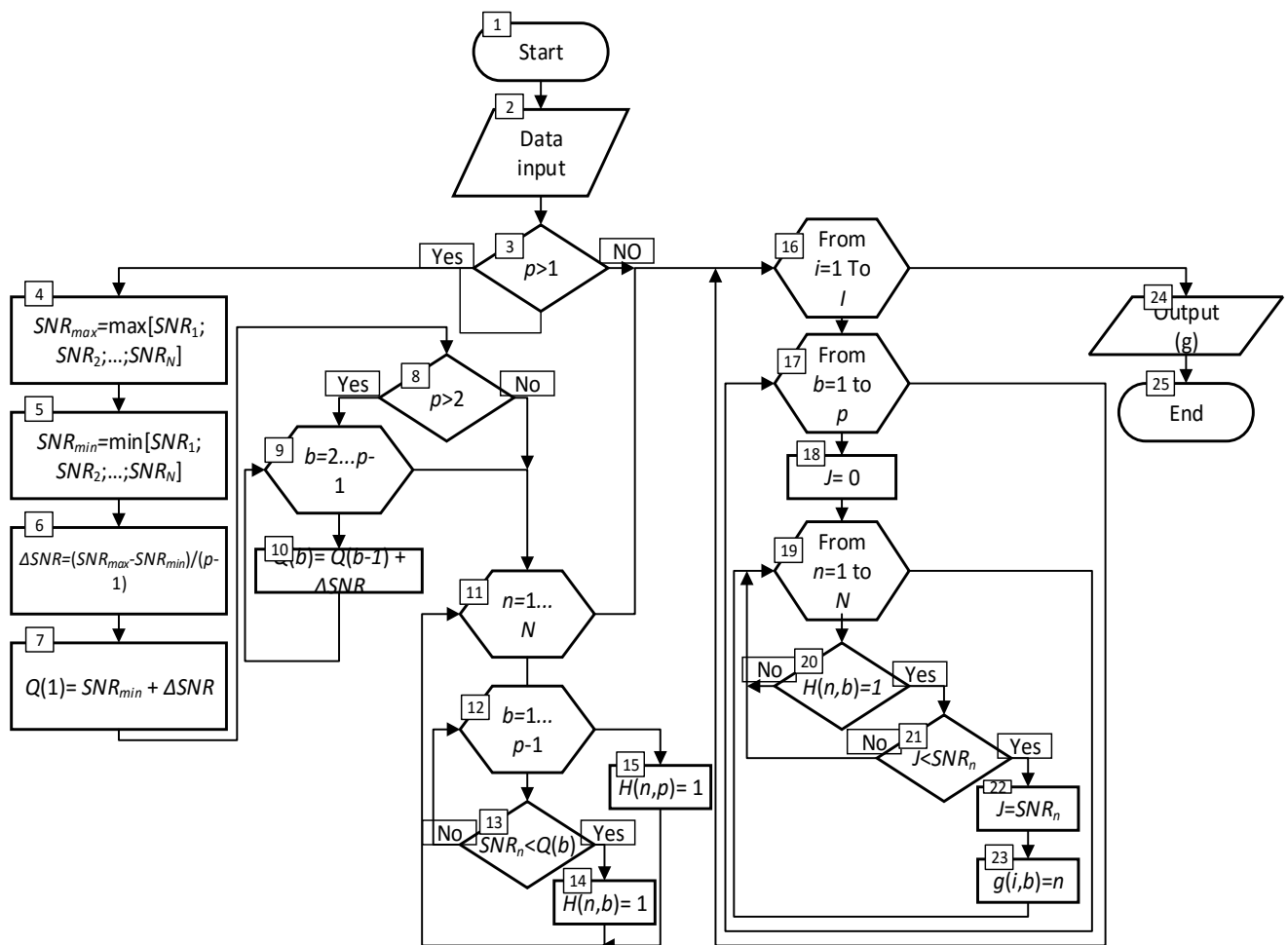


Рис. 3.8. Блок-схема запропонованого методу

Моделювання проводиться згідно такої методики:

**Етап 1.** Виконується збір даних у мережі про стан низхідного каналу та формується множина параметрів каналу. Необхідні такі дані:

- 1)  $N$  – кількість мобільних станцій у мережі;
- 2)  $N_{RB}^{DL}$  – кількість ресурсних блоків, згенерованих протягом тривалості передавання у одному субфреймі низхідного каналу. У залежності від ширини смуги пропускання каналу значення можуть бути такі: 6, 15, 25, 50, 75, 100;
- 3)  $P$  – кількість ресурсних блоків, що формують одну групу. Залежить від ширини смуги пропускання каналу. Цей параметр також визначає кількість підмножин, що формуються з використанням першого типу розподілу ресурсів;
- 4)  $SNR_n$  – співвідношення С/Ш на вході  $n$ -ої мобільної станції (дБ). Цей параметр визначає значення CQI  $i$ , відповідно, сигнально-кодову конструкцію, що використовується для передавання даних  $n$ -ому абонентові;
- 5)  $K_s$  – кількість піднесучих у одному ресурсному блоці. Цей параметр залежить від частотного рознесення між піднесівними. Може приймати значення 12 та 24, що відповідає частотному рознесенню між піднесівними 15 та 7,5 кГц;
- 6)  $N_{symb}^{RB}$  – кількість OFDM-символів, що формують один ресурсний блок. Приймає значення  $N_{symb}^{RB}=7$  у випадку стандартного циклічного префіксу. Тривалість стандартного циклічного префіксу першого OFDM-символу складає  $T_{cp}^1=5,2$  мкс, а від другого до шостого OFDM-символу –  $T_{cp}^{2-6}=4,7$  мкс. У випадку використання розширеного циклічного префіксу ( $T_{cp}=16,7$  мкс) ресурсний блок містить шість OFDM-символів ( $N_{symb}^{RB}=6$ );
- 7)  $T_{SF}=1\text{ms}$  – тривалість передавання одного субфрейму;

8)  $N_{SF}^{RB}=2$  – кількість ресурсних блоків, що формуються на одній піднесівній для передавання одного субфрейму;

9)  $N_{RB}^{RBGsubset}(p)$  – кількість ресурсних блоків, що належать підмножині  $p$ . Він визначається згідно з виразом

$$N_{RB}^{RBGsubset}(p) = \begin{cases} \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P^2} \right\rfloor P + P, & p < \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P} \right\rfloor \bmod P; \\ \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P^2} \right\rfloor P + (N_{RB}^{DL} - 1) \bmod P + 1, & p = \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P} \right\rfloor \bmod P; \\ \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P^2} \right\rfloor P, & p > \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P} \right\rfloor \bmod P. \end{cases} \quad (3.16)$$

**Етап 2.** У випадку, коли в низхідному каналі згенеровано декілька підмножин (блок 3), є можливість розділення мобільних станцій на групи, кількість яких відповідає кількості підмножин. Такий розподіл здійснюється з урахуванням співвідношення сигнал/шум. Спершу визначаємо максимум (блок 4), а потім мінімум (блок 5) співвідношення сигнал/шум. На цій підставі визначаємо порогові значення для груп мобільних станцій (блоки 7-10). Кількість порогів залежить від кількості підмножин і становить  $P-1$ . Блоки 11-15 забезпечують розподіл мобільних станцій на основі використання матриці  $H$ . Її елемент  $h(n, b)$  приймає значення 1 у випадку, коли  $n$ -та мобільна станція може бути обслужена ресурсними блоками з  $b$ -ої підмножини, у іншому випадку такий елемент приймає значення 0. Отже, результатом другого етапу є розподіл мобільних станцій в групи у залежності від співвідношення сигнал/шум. Такий підхід усуває недолік методу максимуму співвідношення  $S/I$ , який полягає у призначенні всіх частотно-часових ресурсів мобільній станції із найбільшим значенням співвідношення сигнал/шум.

**Етап 3.** На третьому етапі напряму виконується метод максимізації відношення  $S/I$ , який полягає у наданні ресурсних блоків різних підмножин відповідним мобільним станціям. На  $i$ -ому інтервалі (блок 16) здійснюється



вимірювання поточних значень співвідношення С/Ш на входах всіх мобільних станцій. У ході виконання блоків 20-23 визначається мобільна станція, яка має найвище значення С/Ш на вході у кожній групі. У результаті на  $i$ -ому інтервалі всі ресурсні блоки певної підмножини будуть надані цій мобільній станції. У зв'язку з тим, що умови у каналі постійно змінюються, слід постійно отримувати актуальну інформацію щодо значень С/Ш. Тобто, надання ресурсних блоків кожної з підмножин одній із мобільних значень кожної групи залежатиме від поточних значень С/Ш.

### 3.5. Модель групової багат шарової відеотрансляції у мережі LTE

У роботі запропоновано нову багат шарову модель групової відеотрансляції у мережі LTE, яка дає змогу об'єктивно оцінити баланс між якістю сприйняття послуги та справедливістю розподілу ресурсів.

Припустимо, що  $S$  – символна швидкість, яка заздалегідь виділяється для групової відеосесії; в системі існує  $L$  різних схем модуляції і кодування МС. Нехай можлива кількість відеос шарів в цій системі не може бути більшою, ніж  $L$  і окрема МС застосовується до кожного відео шару  $l$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$ .

Нехай у дальній зоні комірки, де застосовується МС1, є  $N$  приймачів, які рівномірно розподілені в комірці. Нехай існує  $n_l$  приймачів, які можуть бути розташовані всередині покриття МС рівня  $l$ , але не у зоні покриття рівня МС  $l+1$ .

Позначимо:

$$w_l = \frac{n_l}{N}, \text{ де } \sum_{l=1}^L w_l = 1 \quad (3.17)$$

Нехай  $S_l$  – символна швидкість передавання, виділена для шару  $l$ .

$$S_l = \alpha_l S, \text{ де } \sum_{l=1}^L S_l \leq S, \quad (3.18)$$

Визначимо вектор розподілу ресурсів  $A$ .

$$A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L), \quad \text{де } \sum_{l=1}^L \alpha_l \leq 1 \quad (3.19)$$

Якщо рівень  $l$  МС може модулювати  $r_l$  біт одним символом, то відео-шар  $l$  кодується і передається в смузі:

$$B_l = S_l \cdot r_l = \alpha_l \cdot r_l \cdot S \quad (3.20)$$

Вектор розподілу ресурсів  $A$  описує те, що для кожного рівня МС виділяється обмежена частина ресурсів, таким чином він визначає кількість шарів відео, та швидкість їх передачі, тобто швидкості кодування відеоданих.

Приймач всередині зони дії виду модуляції і кодування рівня  $l$ , проте, не всередині рівня  $l+1$ , може приймати дані з відео шару 1 до відео шару  $l$ . Розглядається ідеальний випадок без втрат і без шуму навколишнього середовища, де сукупна швидкість передачі даних  $R_l$  на вході приймача є :

$$R_l = \sum_{i=1}^l B_i = S \sum_{i=1}^l \alpha_i \cdot r_i = S \cdot x_l \quad (3.21)$$

$$\text{де } x_l = \begin{cases} 0, & \text{if } l = 0 \\ x_{l-1} + \alpha_l \cdot r_l, & \text{for } 1 \leq l \leq L \end{cases}$$

У якості моделі, яка узагальнює зв'язок між QoE (якістю сприйняття) та спотвореннями, вибрана  $S$ -подібна крива (рис. 3.9), а функція QoE будується у залежності від середньої швидкості відеопотоку  $R$ , де швидкість кодування відео позначається як  $R_s$ .

$$Q(R) = \frac{1 - e^{-c1 \left(\frac{R}{R_s}\right)^{c2}}}{1 - e^{-c1}}. \quad (3.22)$$

Змінні середовища  $C_1$  і  $C_2$  вказують на спотворення відео. При  $C_1 = 6$ ,  $C_2 = 2$ , як правило, передбачається, що середовище є ідеальним безпровідним каналом, а при  $C_1 = 6$ ,  $C_2 = 6$ , вважаємо, що певна ділянка каналу зашумлена.

$C_1 = 6$ ,  $C_2 = 20$  визначають канал, шумова обстановка у якому швидко змінюється і є гіршою, ніж при  $C_2 = 6$ .

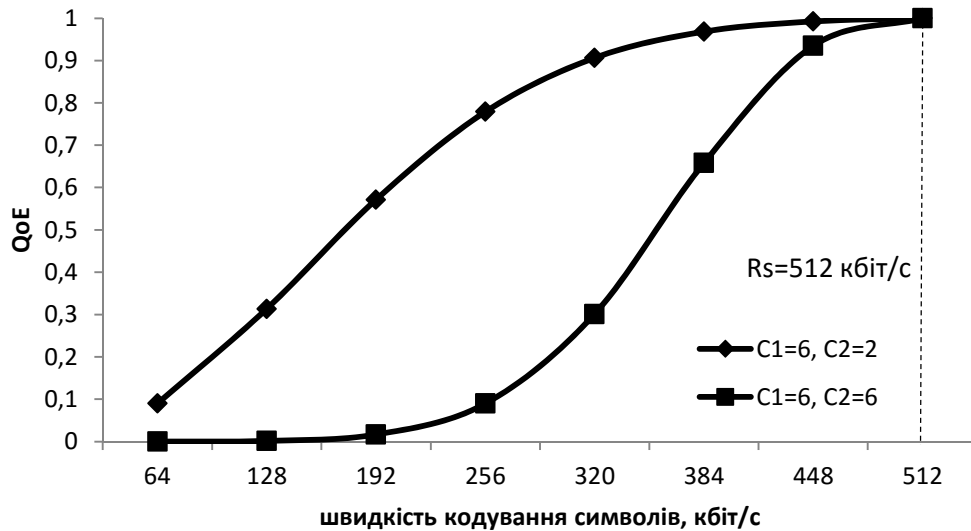


Рис. 3.9. Функція QoE як залежність від швидкості передавання відеопотоку

Допустима якість сприйняття користувачами наданих послуг є функцією допустимої швидкості передачі даних  $R$  та стратегії розподілу ресурсів з метою максимізації сумарної якості сприйняття для всіх приймачів:

$$\begin{aligned}
 A_{\max\_QoE} &= \arg \max_A \left( \sum_{i=1}^N Q(R_i) \right) = \arg \max_A \left( \frac{1}{N} \sum_{l=1}^L n_l \cdot Q(R_l) \right) \\
 &= \arg \max_A \left( \sum_{i=1}^L w_l \cdot Q(R_i) \right), \text{ коли } \left( \sum_{i=1}^L S_i \leq S \right)
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Якщо розглядати рівномірність розподілу ресурсів між приймачами, то мінімаксна справедливість розподілу демонструє кращу якість сприйняття, ніж PF (пропорційна справедливість) планування. Тим не менш, PF планування по відношенню до QoE забезпечує більш практичне рішення для компромісу між допустимою якістю сприйняття та обсягом наданих ресурсів.

$$A_{\max\_PFQoE} = \arg \max_A \left( \prod_{i=1}^N Q(R_i) \right) = \arg \max_A \left( \frac{1}{N} \prod_{l=1}^L Q(R_l)^{n_l} \right), \text{ коли } \left( \sum_{i=1}^L S_i \leq S \right) \tag{3.24}$$

Позначимо через  $Q$  середню QoE з  $N$  приймачів, тоді показник справедливості можна визначити таким чином:

$$\begin{aligned}
F(Q(R_1), Q(R_2), \dots, Q(R_N)) &= \\
&= 1 - \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q(R_i)}{\bar{Q}} - 1 \right| \\
&= 1 - \frac{N}{2(N-1)} \sum_{i=1}^L w_i \cdot \left| \frac{Q(R_i)}{\bar{Q}} - 1 \right|
\end{aligned} \tag{3.25}$$

### Висновки до третього розділу

Представлено удосконалену модель для підвищення пропускної здатності з урахуванням впливу збільшення числа портів антени і числа символів OFDM на продуктивність мережі.

Запропоновано вдосконалений метод збільшення пропускної здатності низхідного каналу передавання даних LTE з підтримкою QoS з використанням різних типів розподілу ресурсів. Цей метод розподіляє доступні ресурси низхідного каналу LTE на основі максимальної справедливості, максимальної сумарної пропускної здатності і пропорційно-справедливого розподілу. Запропонований метод здійснює виділення частотно-часових ресурсів низхідного каналу LTE на основі розподілу ресурсних блоків з використанням нульового типу розподілу ресурсів. Таким чином досягається виділення необхідної пропускної здатності для кожного UE без максимізації загальної продуктивності низхідного каналу LTE.

У роботі проведено дослідження продуктивності мережі за допомогою QoE і QoS при відеотрансляції з використанням S-кривої, яка обрана в якості моделі, що встановлює співвідношення між QoE і швидкістю передавання відеопотоку. Для цього розроблено нову багат шарову модель потокової групової відеотрансляції в LTE мережі.

## РОЗДІЛ 4.

### ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ LTE ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ

В даному розділі проведено дослідження набору параметрів, які впливають на пропускну здатність, якість обслуговування та якість сприйняття інфокомунікаційних послуг. Здійснене дослідження базується на розроблених у третьому розділі методах та моделях, а також враховує базові комунікаційні технології стандарту LTE, моделі яких подано у другому розділі. Результати розділу опубліковані у працях [9, 10, 13, 14, 19-23].

#### **4.1 Застосування засобів підвищення пропускнуї здатності та якості обслуговування на фізичному рівні LTE**

На основі моделювання різного типу антенних систем із використанням симулятора LTE Віденського університету отримано результати залежності BLER від відношення сигнал/шум, що відображає поведінку звітування CQI. До прикладу (рис. 4.1), для досягнення  $BLER=10^{-2}$  у каналі типу RedB з використанням CQI 7 та TxD MIMO 4x2 необхідне відношення сигнал/шум становить 6 дБ, а для таких же умов з використанням OLSM MIMO 4x2 відношення сигнал/шум становить 12 дБ, тобто за умов більш зашумленого середовища доцільно використовувати TxD MIMO 4x2.

##### *4.1.1. Дослідження пропускнуї здатності каналу LTE за різних конфігурацій приймально-передавального тракту*

На рис. 4.2, а подано характеристики пропускнуї здатності системи у залежності від відношення сигнал/шум, отримані з використанням того ж

інструменту моделювання. У процесі моделювання не враховується HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), і жодні повторні передачі не виконуються. Легко бачити, що для тих же значень SNR максимально досяжна пропускна здатність перевищує реальну на основі CQI приблизно у 1,3 рази. Відстань від кривої максимальної ємності системи для всіх кривих складає близько 2 дБ. Ця відстань збільшується зі зростанням CQI, що пояснюється негаусівською природою сузір'їв QAM.

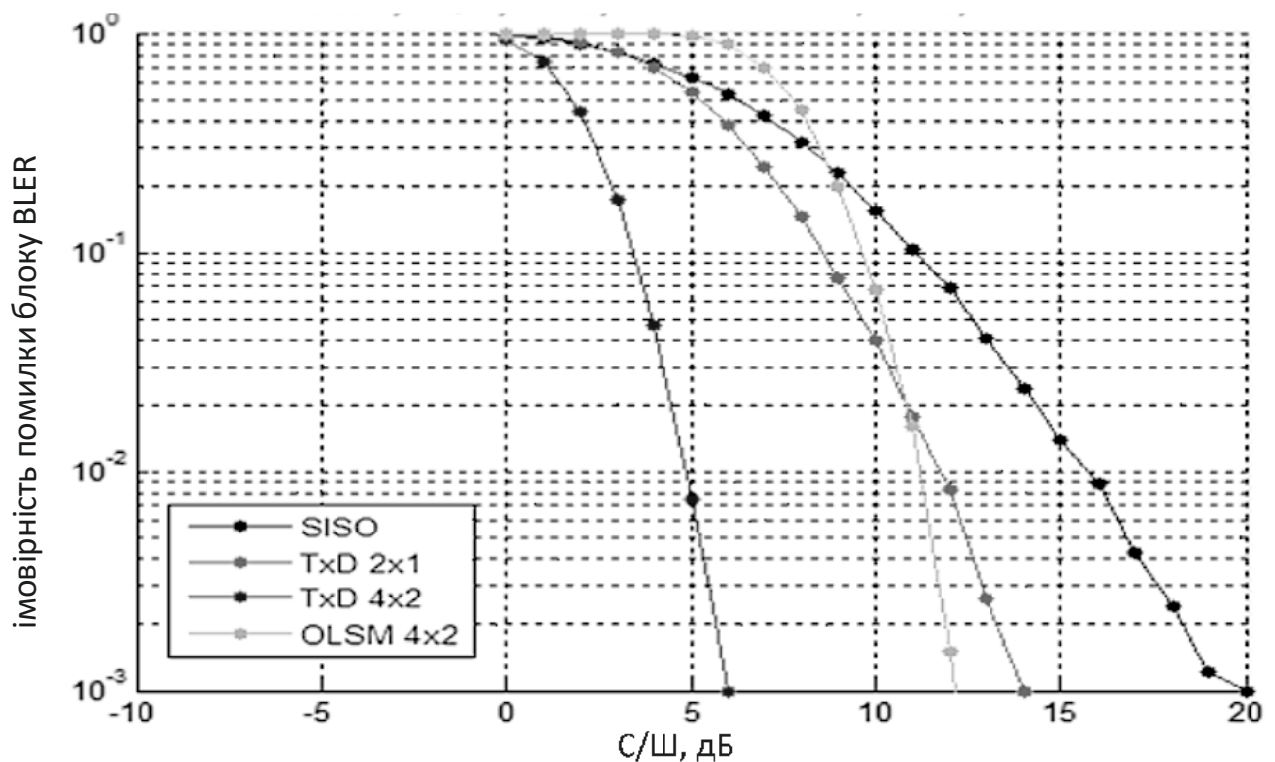


Рис. 4.1. Залежність BLER від відношення сигнал/шум для різних конфігурацій приймально-передавального тракту

Залежність пропускної здатності від відношення сигнал/шум із застосуванням AMC представлена на рис. 4.2, б для одного користувача, який отримує усі доступні ресурси. Варто відзначити, що характер кривих на рис. 4.2, а і 4.2, б подібний, хоча у другому випадку допускалося до трьох повторних передач. Причина такої подібності полягає у тому, що в AWGN каналі перемикання між схемами кодування і модуляції здійснюється ідеально, і немає необхідності у повторних передачах.

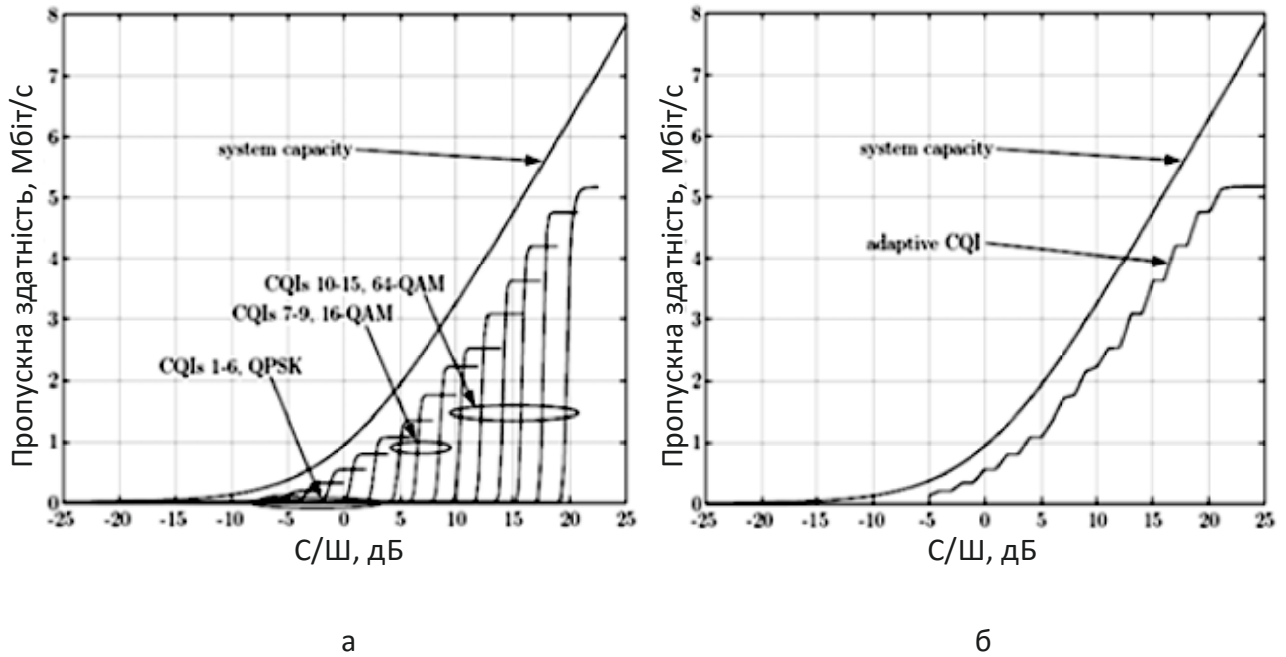


Рис. 4.2. Залежність пропускної здатності від відношення сигнал/шум: без HARQ у AWGN каналі (а); з AMC і HARQ у AWGN каналі (б)

На рис. 4.3 представлено сімейство залежностей максимально досяжної пропускної здатності системи від відношення сигнал/шум для різних конфігурацій приймально-передавального тракту. Чим більше передавальних антен використовуються для передачі, тим більше експериментальних символів вставляються в кадр OFDM і тим нижча максимальна пропускна здатність може бути досягнута.

У випадку конфігурації OLSM, передаються два просторово розділені потоки даних, що приводить до подвоєння максимальної пропускної здатності системи TxD 4x2. Варто зазначити, що результати, представлені на рис. 4.3, отримані без адаптивного попереднього кодування каналу. Отже, може очікуватися перевага схеми TxD, коли буде використовуватись ідентифікатор комірки PCI (Physical Cell Identifier).

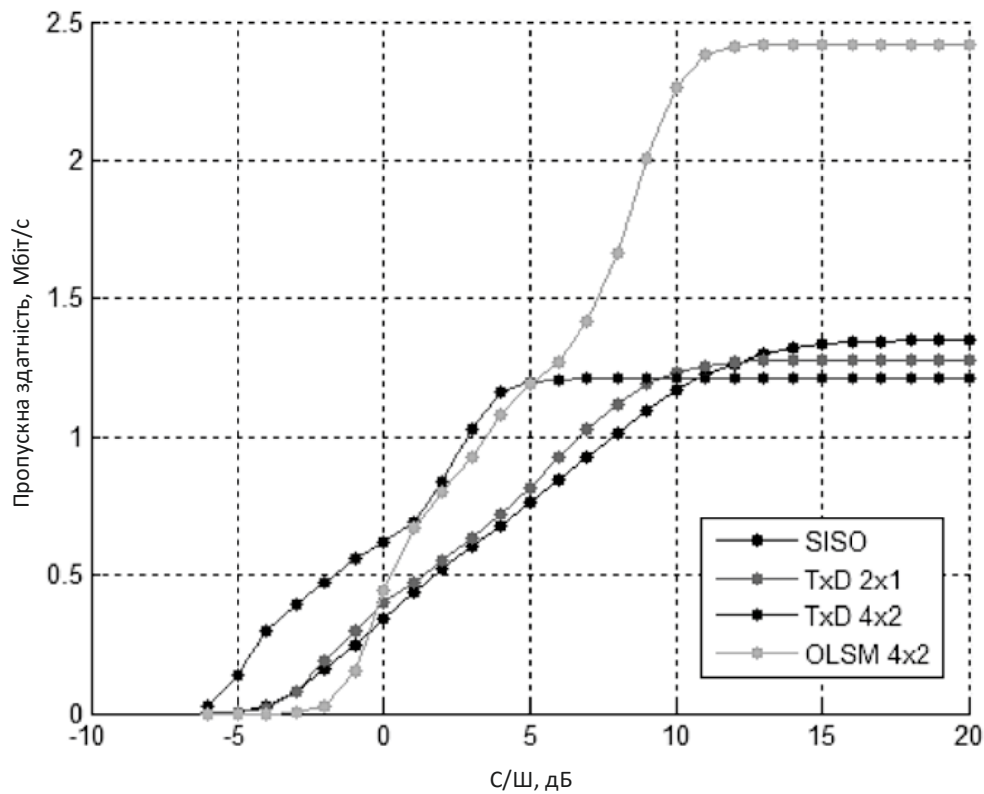


Рис. 4.3. Залежність пропускної здатності каналу від відношення сигнал/шум для різних конфігурацій приймально-передавального тракту

#### 4.1.2. Дослідження впливу компенсації інтерференції та підвищення пропускної здатності безпроводного каналу LTE

У роботі досліджено вплив методів підлаштування параметрів передавання до умов каналу. Для порівняння ефективності ZF та MMSE використовувалась схема підсумовування диференціально-зважених сигналів (MRC) з кожного елемента антенної системи. Різниця між використанням MRC і ZF MIMO полягає у значеннях BER: наприклад, для співвідношення сигнал/шум 20 дБ BER для MRC становить близько  $10^{-5}$ , а для ZF MIMO 2x2  $BER=10^{-3}$ , що підтверджує покращення якості обслуговування із застосуванням методу підсумовування диференціально-зважених сигналів з кожного елемента антенної системи (рис. 4.4).



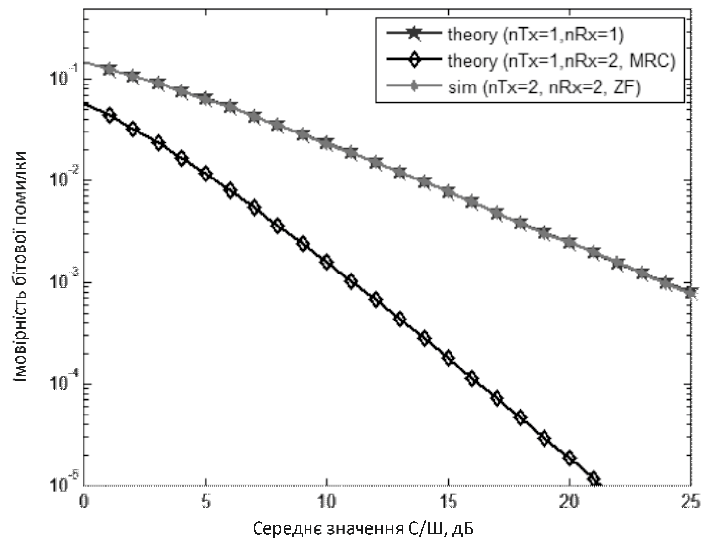


Рис. 4.4. Порівняння BER для каналу MIMO з компенсатором ZF та MRC

В порівнянні з ZF, MMSE демонструє кращу завадозахищеність за рахунок урахування шумового параметра в рівнянні компенсації (рис. 4.5). Але для високих значень SNR ця різниця зменшується.

Легко бачити, що пропускна здатність каналу з цифровим діаграмоутворенням вища в обох випадках, а з використанням модуляції 16 QOAM досягається на 35-40 % вища пропускна здатність, ніж для QPSK в області значень SNR вище 15 дБ.

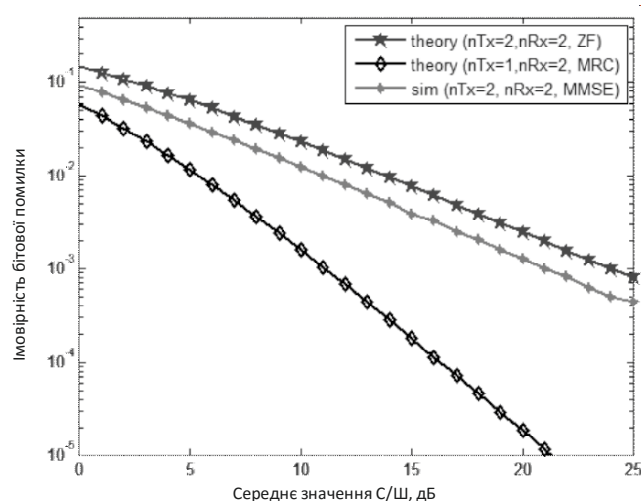


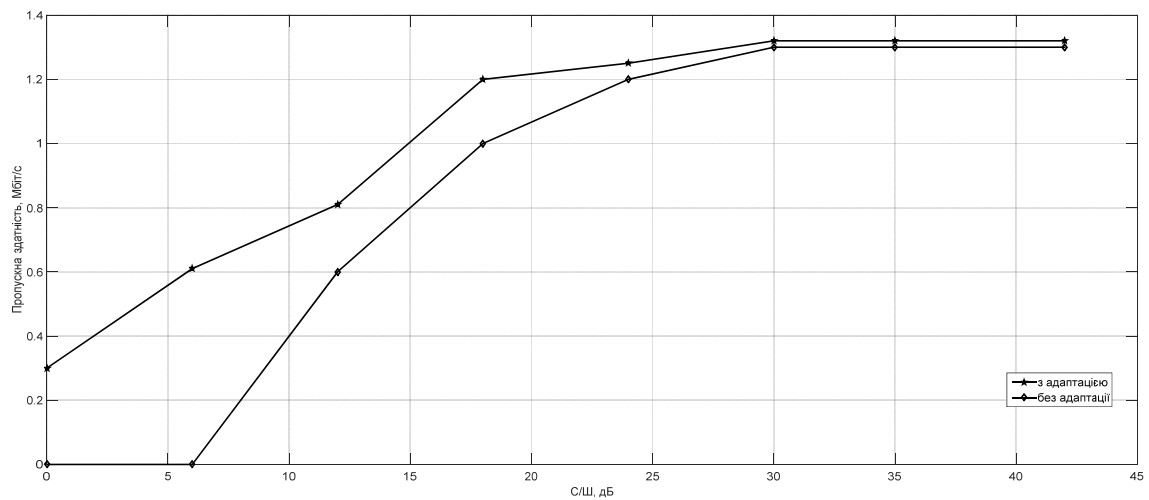
Рис. 4.5. Порівняння BER для каналу MIMO з компенсаторами ZF, MMSE та MRC

Проведено дослідження технічної ефективності іншого методу підвищення пропускної здатності, який описаний у другому розділі роботи – адаптивного

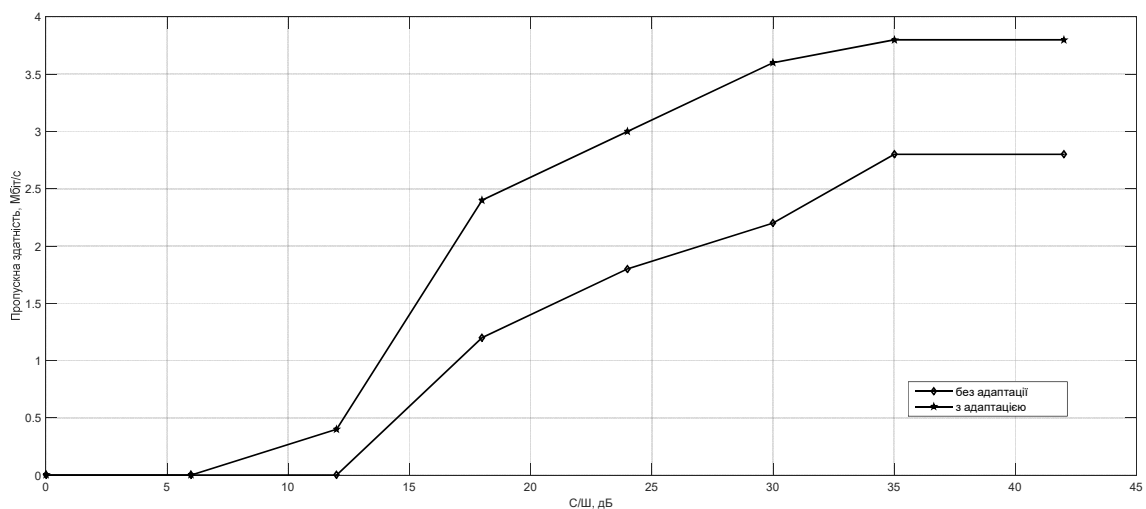
діаграмоутворення. Проведено моделювання системи з та без діаграмоутворення з використанням модуляцій типу QPSK та 64-QAM. Кодова швидкість встановлена рівною 1/3.

На рис. 4.6 представлено результати дослідження пропускної здатності LTE з використанням та без використання цифрового діаграмоутворення і з використанням двох видів модуляцій: а) QPSK, б) 64 QAM.

Легко бачити, що пропускна здатність каналу з цифровим діаграмоутворенням вища в обох випадках, а з використанням модуляції 64 QAM досягається на 25 % вища пропускна здатність, ніж для QPSK в області значень SNR вище 15 дБ.



а



б

Рис. 4.6. Порівняння пропускної здатності каналу LTE з та без ВФ з використанням модуляцій: а) QPSK, б) 64 QAM

4.1.3. Дослідження впливу вибору кількості портів антенної системи та кількості символів на пропускну здатність каналу LTE

Проведено моделювання роботи каналу LTE за різних сигнально-кодових конструкцій для максимальної та мінімальної довжини кодового слова (40 та 6144). Модель завади у каналі – адитивний білий гаусівський шум. Використано стандартний циклічний префікс та швидкість турбокодера 1/3. Проведено моделювання таких типів модуляцій: QPSK, 16-QAM, та 64-QAM. У табл. 4.1 подано основні параметри моделювання. З використанням поданих нижче співвідношень обчислено решту показників, які подані у табл. 4.1

У загальному випадку сузір'я M-QAM, де  $M=2^b$  і  $b$  – кількість бітів у кожному символі сузір'я, має такий алфавіт:

$$\alpha_{MQAM} = \{\pm(2m - 1) \pm (2m - 1)j\}, \text{ де } m \in \left\{1, \dots, \frac{\sqrt{M}}{2}\right\} \quad (4.1)$$

Для сузір'я 64-QAM ( $M=64$ )  $m \in \{1,2,3,4\}$  алфавіт такий

$$\alpha_{64QAM} = \begin{bmatrix} \pm 7 \pm 7j & \pm 7 \pm 5j & \pm 7 \pm 3j & \pm 7 \pm 1j \\ \pm 5 \pm 7j & \pm 5 \pm 5j & \pm 5 \pm 3j & \pm 5 \pm 1j \\ \pm 3 \pm 7j & \pm 3 \pm 5j & \pm 3 \pm 3j & \pm 3 \pm 1j \\ \pm 1 \pm 7j & \pm 1 \pm 5j & \pm 1 \pm 3j & \pm 1 \pm 1j \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Загальна енергія окремих символів алфавіту

$$E_{\alpha} = \sum_{m=1}^{\frac{\sqrt{M}}{2}} |(2m - 1) + j(2m - 1)|^2 = \frac{\sqrt{M}}{3} (M - 1) \quad (4.3)$$

Середня енергія

$$E_{MQAM} = 2/3 (M-1) \quad (4.4)$$

Наступні співвідношення дають змогу врахувати вплив гаусівського шуму

$$y = k\sqrt{E_s} + n \quad (4.5)$$

де  $E_s$  – енергія,  $K = \sqrt{\frac{1}{2/3(M-1)}}$  – показник нормалізації,  $S$  – символ СКК, що підлягає передаванню,  $n$  – шум із дисперсією шуму  $\sigma^2 = N_0/2$ .

Таблиця 4.1

## Параметри моделювання

Параметр	Значення
Ширина смуги пропускання каналу	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 (МГц)
Розмірність перетворення Фур'є	2048
Максимальна кількість ресурсних блоків	100
Режим дуплексу	FDD
Модель каналу	AWGN
Завадосстіке кодування	турбокодування, R=1/3
Модуляція	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Тривалість фрему	10 мс
Рознесення між піднесучими	15 кГц
Циклічний префікс	Стандартний
Розмір блочного коду	40, 6144
Швидкості кодера	0.33 to 0.92
Антенна система	SISO, 2x2 MIMO and 4x4 MIMO
Максимальна кількість ітерацій турбокодера	10
Глибина турбокоду	6
Мінімальна BER	$10^{-9}$
Максимальна BER	$10^{-4}$
Кількість помилок	300

Максимальна пропускна здатність у смузі 1,4 МГц з використанням одного порту антени і двох OFDM символів, призначених на PDCCH, 64-QAM модуляції з кодовою швидкістю 0.71, становить 3,935 Мбіт/с; в смузі 20 МГц з використанням чотирьох антенних портів, модуляції 64-QAM з кодовою швидкістю 0,85 – 276.32 Мбіт/с. З використанням максимально досяжної кодової швидкості 0,92 може бути досягнута пропускна здатність 299.122 Мбіт/с.

Бачимо, що теоретичний максимум пропускної здатності досягається в смузі пропускання 20 МГц з використанням чотирьох антенних портів, модуляції 64-QAM, швидкості кодера 0.92, і становить 299.122 Мбіт/с.

На підставі моделі підвищення пропускної здатності каналу LTE з урахуванням впливу збільшення числа портів антени і числа символів OFDM на продуктивність мережі проведено дослідження досяжних значень пропускної здатності каналу. Результати наведено на рис. 4.7.

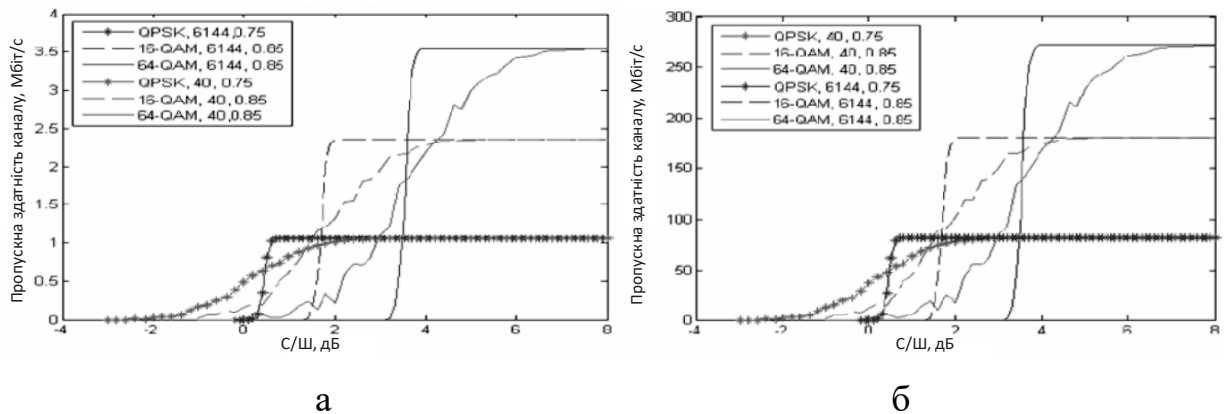


Рис. 4.7. Залежність пропускної здатності каналу FDD PDSCH від відношення сигнал/шум з урахуванням множини параметрів радіоканалу у смузі 1,4 МГц з антенною системою SISO (а) та 20 МГц з антенною системою MIMO 4x4 (б)

#### 4.2. Моделювання та дослідження розподілу ресурсів за удосконаленою моделлю нульового типу

У роботі запропоновано удосконалений метод розподілу ресурсів, який базується на використанні нульового та першого типу розподілу ресурсів LTE. Результати, представлені на рис. 4.8, а, свідчать, що завантаженість пропускної здатності каналу для: методу максимальної справедливості становить 0,682, методу пропорційної справедливості – також 0,682 і методу максимізації пропускної здатності – 0.

З використанням запропонованого методу, завантаженість пропускної здатності, що підлягає балансуванню, мала найвище значення серед усіх підходів, згаданих вище, і становила 0,988. Результати також можуть бути представлені у вигляді залежності імовірності виділення необхідної пропускної здатності каналу (рис. 4.8, б).

Для розподілу груп ресурсних блоків у низхідному каналі в якості вхідних даних були використані наступні значення:

- ✓  $N = 5$  – кількість UE;
- ✓  $K = 50$  – кількість блоків планування, утворених на одному підкадрі у низхідному каналі;
- ✓  $K_s = 12$  – кількість піднесучих для передачі даних в одному підканалі;
- ✓  $R_c^1 = 2$  (QPSK) – кодова швидкість, яка використовується при кодуванні сигналу першого UE;  $R_c^2 = 4$  (16-QAM) – другого UE;  $R_c^3 = 6$  (32-QAM) – третього UE;  $R_c^4 = 6$  (32-QAM) – четвертого UE;  $R_c^5 = 6$  (32-QAM) – п'ятого UE;
- ✓  $k_b^1 = 193/1024$  – біти навантаження символу першого UE;  $k_b^2 = 490/1024$  – другого;  $k_b^3 = 948/1024$  – третього;  $k_b^4 = 772/1024$  – четвертого;  $k_b^5 = 666/1024$  – п'ятого;
- ✓  $N_{symb}^{RB} = 7$  – кількість символів в одному ресурсному блоці;
- ✓  $T_{SF} = 1$  мс – тривалість передачі одного підкадру;
- ✓  $N_{SF}^{RB} = 2$  – кількість RB, сформованих на тій же піднесучій і розподілених при передачі одного підкадру на UE;
- ✓  $R_{необ}^n = 0 \div 2.5$  Мбіт/с – необхідна швидкість передачі.

Відповідно до табл. 3.2, параметр  $p$  дорівнює 3. Таким чином, кількість груп ресурсних блоків, утворених протягом одного підкадру становить:

$$K_{RBG} = \left\lfloor \frac{50}{3} \right\rfloor = 17.$$

Відповідно до співвідношень, наведених у третьому розділі, отримано результати балансування пропускної здатності між мобільними станціями у межах коміки. Як видно з рис. 4.8, а, з використанням відомих методів розподілу ресурсів показник справедливості розподілу ресурсів становив: для методу максимізації показника справедливості – 0,6818, для методу пропорційної справедливості – 0,6818, для методу максимізації сумарної

пропускної здатності – 0. З використанням запропонованого методу балансування пропускної здатності за період спостереження показник справедливості досяг значення 0,9875. Ці ж результати можуть бути подані у формі імовірності того, що мобільній станції буде надана запитана пропускна здатність (рис. 4.8, б)

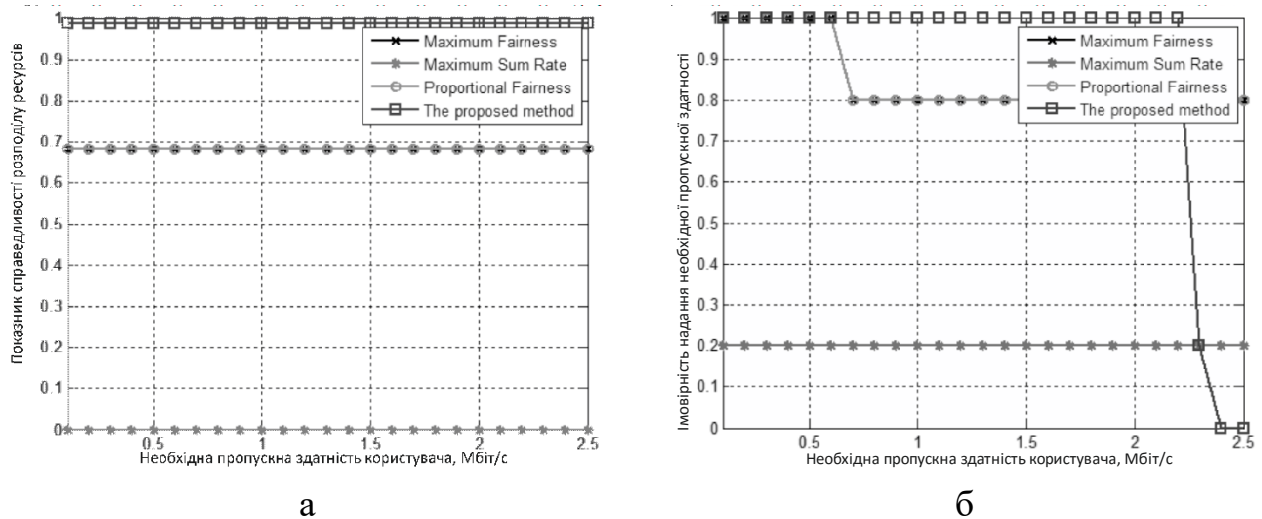


Рис. 4.8. Залежність а) справедливості розподілу пропускної здатності, б) імовірності виділення необхідної пропускної здатності від необхідної пропускної здатності кожному UE із використанням різних методів розподілу ресурсів у низхідному каналі, що базуються на нульовому типі розподілу LTE

Також досліджено розподіл пропускної здатності між мобільними терміналами шляхом призначення груп ресурсних блоків в низхідному каналі у залежності від необхідної пропускної здатності конкретній мобільній станції. Результати свідчать, що з використанням методів максимізації справедливості та пропорційної справедливості необхідна пропускна здатність не забезпечується для першої мобільної станції, починаючи з 0,6 Мбіт/с. Застосування методу максимізації сумарної пропускної здатності необхідна пропускна здатність забезпечується лише для третьої мобільної станції, яка використовує СКК найвищого порядку. У випадку використання запропонованого методу мобільним станціям забезпечується пропускна здатність у діапазоні швидкостей  $R_{req}^n.0.1 \rightarrow 2.5$  Мбіт/с навіть для станцій, які

мають найнижче співвідношення сигнал/шум на вході приймача. Результати подано на рис. 4.9, а-д.

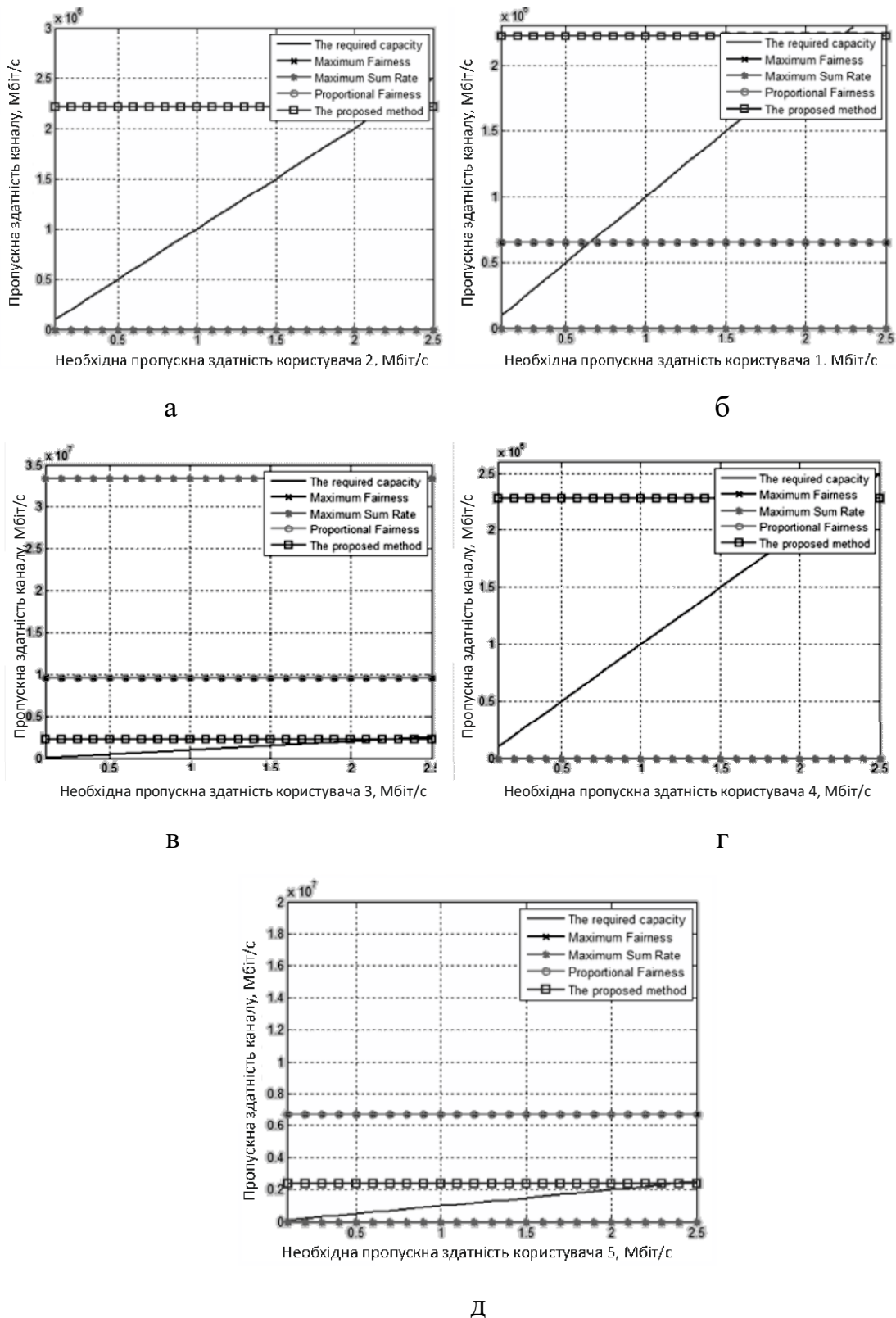


Рис. 4.9. Розподіл ресурсів нульового типу у комірці LTE для п'яти мобільних станцій з використанням різних методів розподілу



Ефективність розподілу зберігатиметься навіть у випадку зниження кількості ресурсних блоків в одному субфреймі до 25, отже показник справедливості залишиться незмінним, що демонструє рис. 4.10. Імовірність надання мобільній станції запитаної пропускної здатності в той же час зменшиться через недостатність ресурсів, що призведе до збільшення втрат викликів (рис. 4.11). Це призведе до зниження пропускної здатності та якості обслуговування у комірці, що видно з рис. 4.12, а-д.

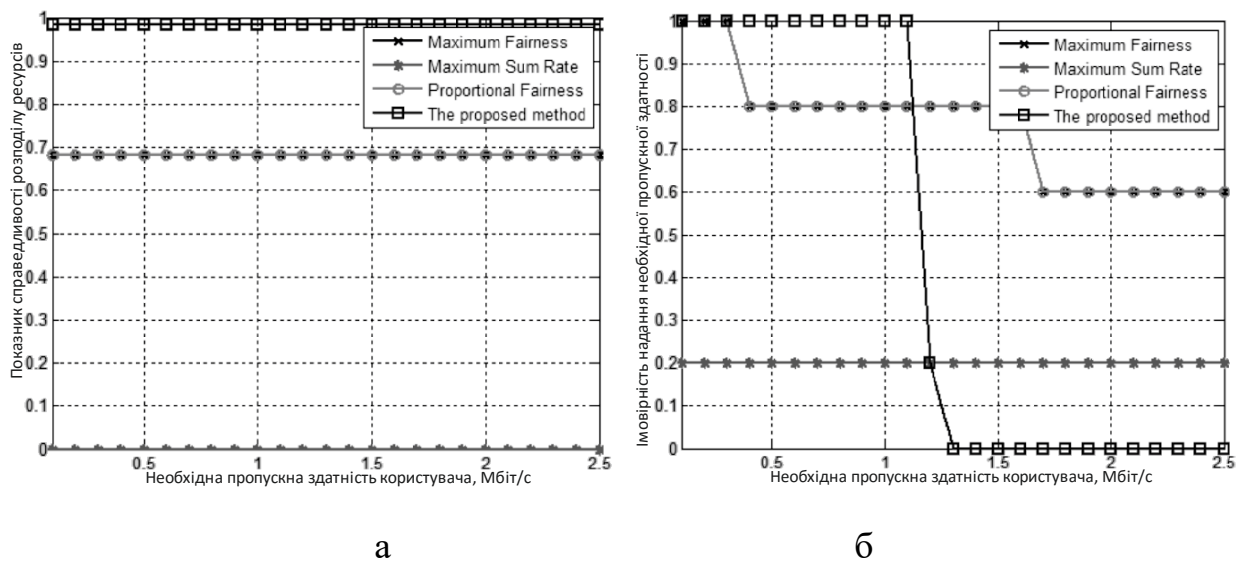
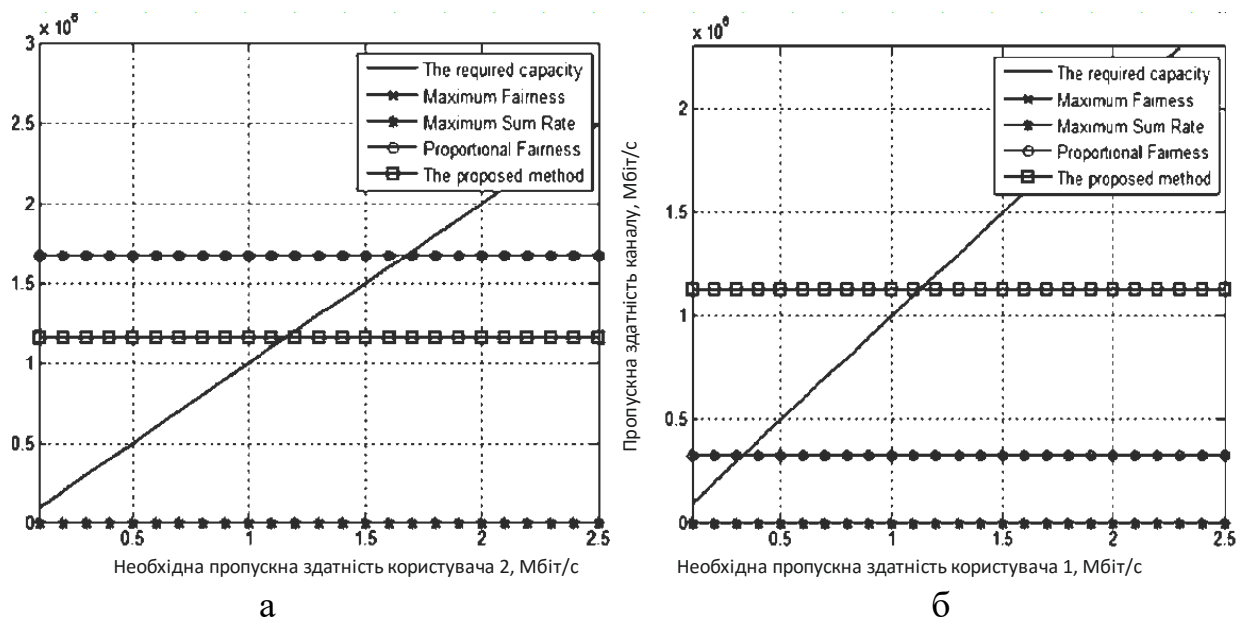


Рис. 4.10. Показник справедливості розподілу (а) та імовірності надання пропускної здатності (б) у випадку зменшення кількості ресурсних блоків до

25



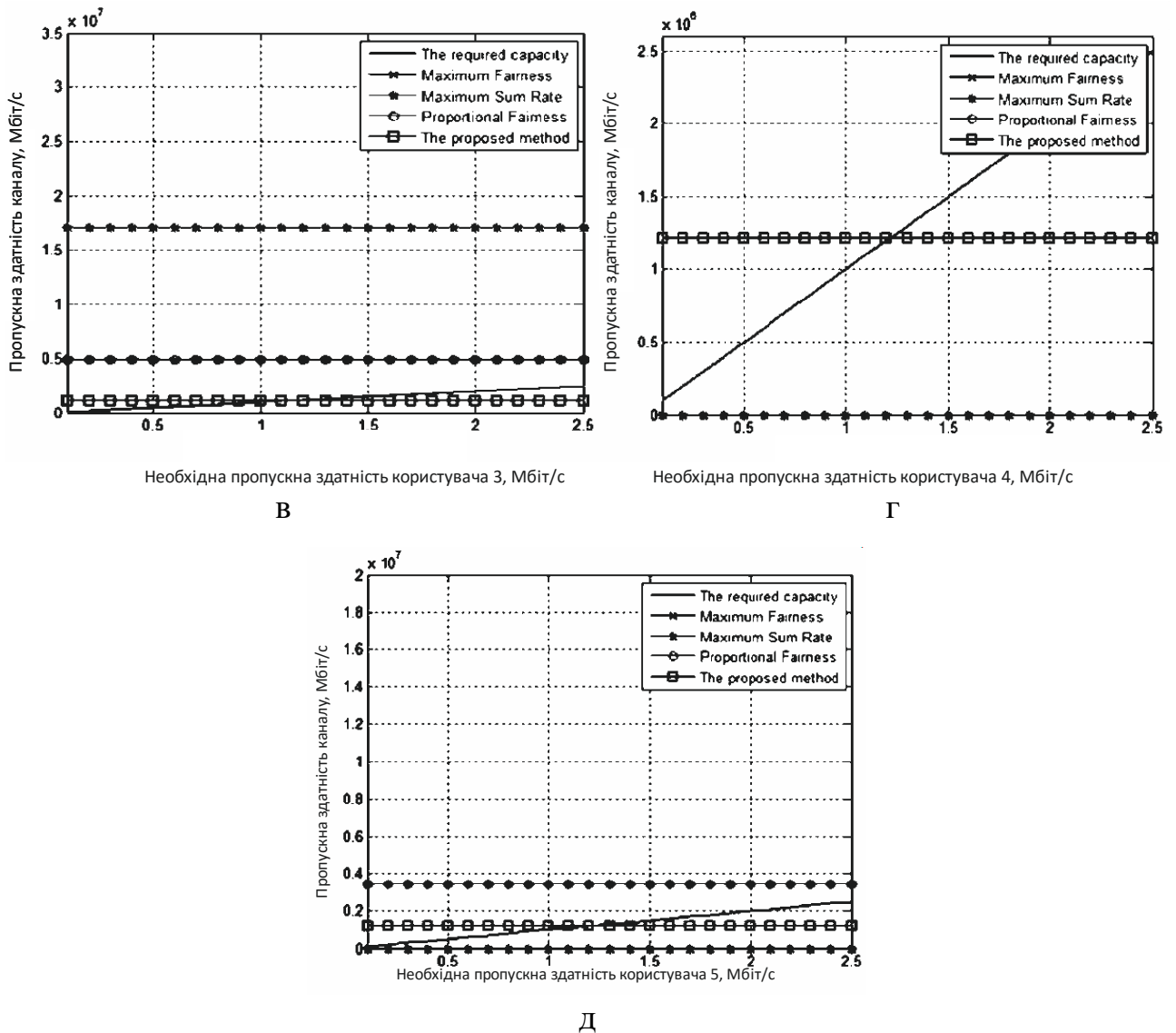


Рис. 4.11. Розподіл ресурсів нульового типу у комірці LTE для п'яти мобільних станцій з використанням різних методів розподілу у випадку зменшення кількості ресурсних блоків до 25

Рис. 4.12 демонструє результати дослідження справедливості розподілу ресурсів у випадку застосування запропонованого методу та методу максимуму співвідношення С/І. Легко бачити, що запропонований метод забезпечує значно вищий показник справедливості для всіх значень необхідної пропускну здатності.

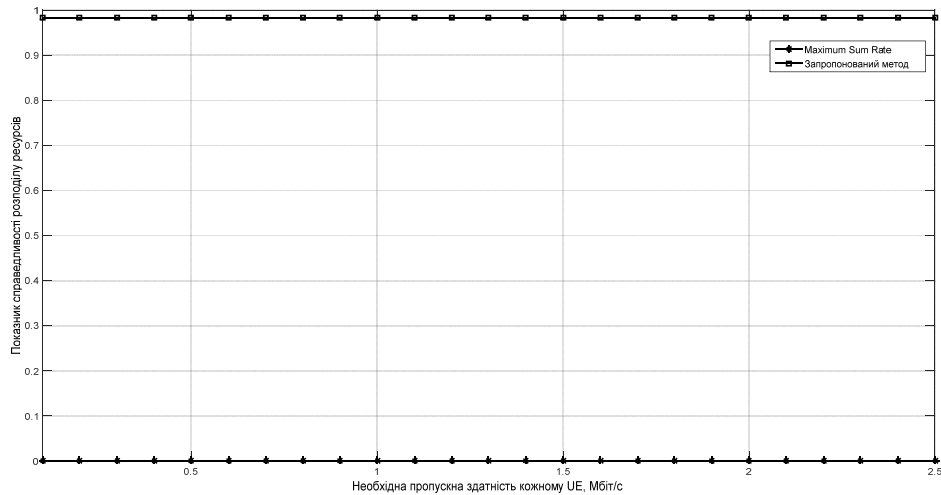


Рис. 4.12. Співвідношення між показником справедливості розподілу ресурсів та необхідною пропускною здатністю для кожного UE

На рис. 4.13 представлено результати дослідження імовірності надання необхідної пропускної здатності кожному UE з використанням запропонованого методу та та методу максимуму співвідношення С/І. Зі зростанням значення необхідної пропускної здатності імовірність призначення із застосуванням запропонованого методу максимальна до значення пропускної здатності 1,3 Мбіт/с. Від цієї точки запропонований метод не забезпечує запитану пропускну здатність для всіх UE. У випадку застосування методу максимуму співвідношення С/І імовірність призначення не змінюється і перебуває на рівні 0,2.

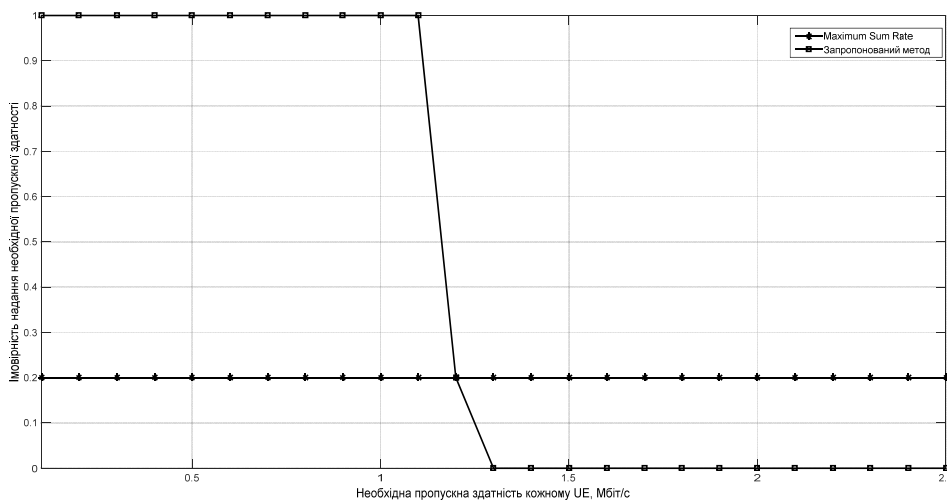


Рис. 4.13. Співвідношення між імовірністю призначення необхідної пропускної здатності кожному UE та її значенням

### 4.3. Моделювання та дослідження розподілу ресурсів за удосконаленою моделлю першого типу

Друга частина цього методу, подана на рис. 3.7, підтверджує свою ефективність, коли розподіл ресурсів здійснюється на основі максимуму відношення сигнал/шум. Тоді, із застосуванням першого типу розподілу LTE ресурсні блоки об'єднуються у підмножини, які не перекриваються, і кожна підмножина може бути використана обмеженою кількістю UE.

Для дослідження ефективності запропонованого підходу проведемо моделювання з такими вхідними параметрами:

- Кількість мобільних станцій  $N = 6$ ;
- Кількість ресурсних блоків, що формуються в одному субфреймі низхідного каналу  $N_{RB}^{DL} = 100$ ;
- Кількість піднесучих для передавання даних у підканалі  $K_s = 12$ ;
- Значення співвідношення сигнал/шум для кожної мобільної станції подано на рис. 4.14;
- Кількість OFDM символів, що формують один ресурсний блок  $N_{symb}^{RB} = 7$ ;
- Тривалість одного субфрейму  $T_{SF} = 1\text{ms}$ ;
- Кількість ресурсних блоків, що формуються на одній піднесучій для передавання одного субфрейму  $N_{SF}^{RB} = 2$ .

Як видно з результатів на рис. 4.14, п'ятий та шостий UE мають найвищі значення відношення сигнал/шум на вході приймача. Отже, в цьому випадку відомий метод максимуму співвідношення сигнал/шум забезпечить надання послуг тільки цим двом UE. У випадку запропонованого удосконаленого методу, відповідно до першого типу розподілу ресурсів, кожний з UE

звертається до ресурсних блоків тільки однієї з чотирьох підмножин (результат отримано для вхідних даних, поданих у дисертаційній роботі).

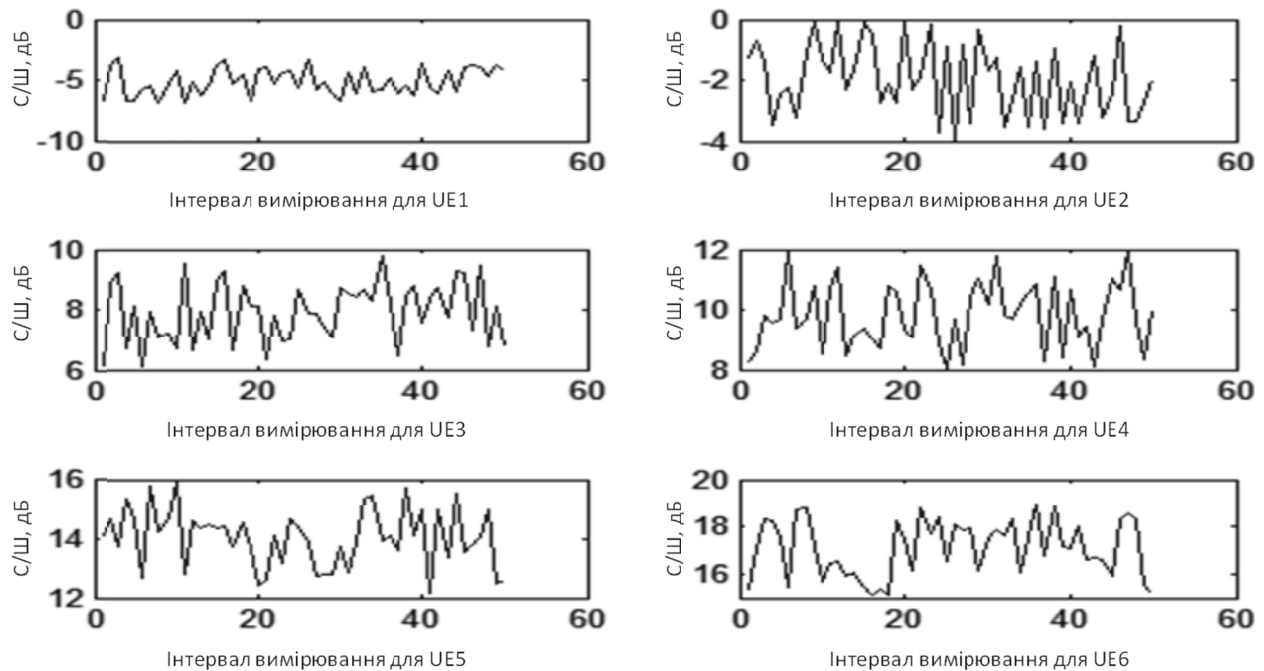


Рис. 4.14. Змодельовані виміри значень SNR для шести станцій, які знаходяться на різній віддалі від eNodeB

Відповідно до поданих вище параметрів моделювання та з урахуванням кількості підмножин  $P = 4$  кількість ресурсних блоків у кожній підмножині становить  $N_{RB}^{RBG\text{subset}}(p) = 25$ .

Згідно із запропонованим методом кожна з мобільних станцій може отримувати ресурси тільки з однієї підмножини ресурсних блоків. Виходячи отриманих результатів, представлено матрицю доступу до ресурсів  $H$ , яка відображає зв'язок між підмножиною ресурсних блоків і UE, що має до неї доступ (рядки – номери підмножин, стовпці – номери UE):

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для цього випадку використання відомого методу розподілу ресурсів за максимум співвідношення  $C/I$  забезпечило мобільним станціям користувачів такі значення пропускної здатності: перша МС – 0 Мбіт/с, друга МС – 0 Мбіт/с,

третя МС – 0 Мбіт/с, четверта МС – 0 Мбіт/с, п'ята МС – 35,6 Мбіт/с, шоста МС – 43,4 Мбіт/с.

У процесі моделювання відповідно до значень С/Ш з використанням запропонованого підходу мобільним станціям була надана така пропускна здатність: перша МС - 209 кбіт/с, друга МС - 237 кбіт/с, третя МС - 376 кбіт/с, четверта МС – 8,59 Мбіт/с, п'ята МС – 17,8 Мбіт/с, шоста МС – 21,7 Мбіт/с.

#### **4.4. Дослідження параметрів QoE та QoS у комірці LTE у процесі передавання мультимедійного трафіку**

##### *4.4.1. Підвищення якості сприйняття трафіку VOIP*

У підрозділі проведено імітаційне моделювання процесу передавання VOIP трафіку у комірці LTE з використанням різних типів кодеків. Схему експерименту подано на рис. 4.15.

У моделюванні бере участь чотири комірки по три мобільні станції у кожній з них. Кожна мобільна станція може здійснити виклик до будь-якої іншої випадково обраної. Мережа функціонує у режимі FDD. Несуча висхідного каналу – 1920 МГц, а низхідного каналу – 2110 МГц. Використовується стандартний циклічний префікс. Метою дослідження є вивчення впливу кодеків та оцінку MOS у такій мережі. Як середовище моделювання використовуємо OPNET Modeler 16.

Оцінку MOS отримано за допомогою використання E-моделі на підставі рейтингового показника. Зі стандартної E-моделі відомо, що стандартний рейтинговий показник становить 93,2, проте, якщо знизиться наприклад показник шуму в приміщенні, то рейтинговий показник знизиться до 82,6, що вплине на продуктивність мережі та призведе до зниження якості сприйняття послуг з 4,41 до 4,12 в термінах оцінки MOS.

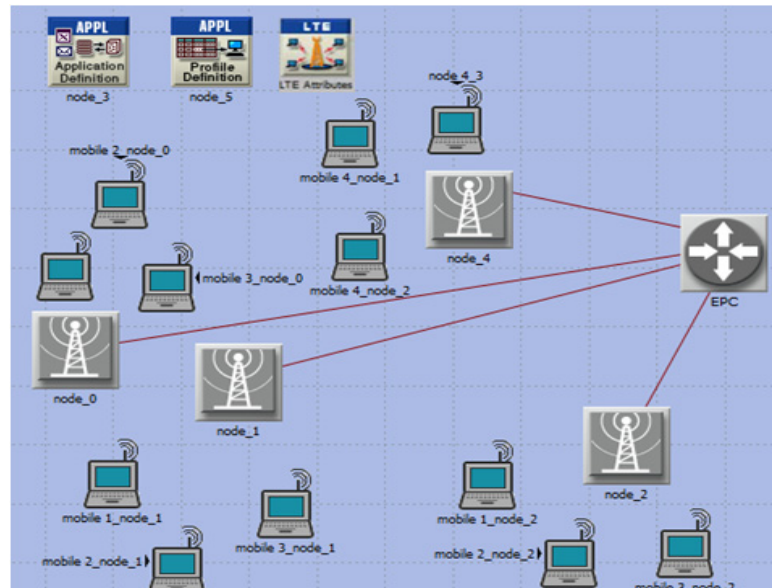


Рис. 4.15 Схема експерименту для дослідження якості сприйняття голосового трафіку у мережі LTE

З використанням одного і того ж кодека на рис. 4.15 та 4.16 подано результати залежності R фактора від односторонньої затримки передавання VOIP трафіку. Варто зазначити, що E-модель передбачає наявність одного користувача, який передає, і одного користувача, який приймає в один момент часу, а у запропонованій моделі ця кількість не обмежується. Отже, може бути отримана більш точна оцінка якості сприйняття. У підсумку відзначимо, що оцінка MOS залежатиме від кількості одночасних активних пар мобільних станцій та від типу кодека, який використовується.

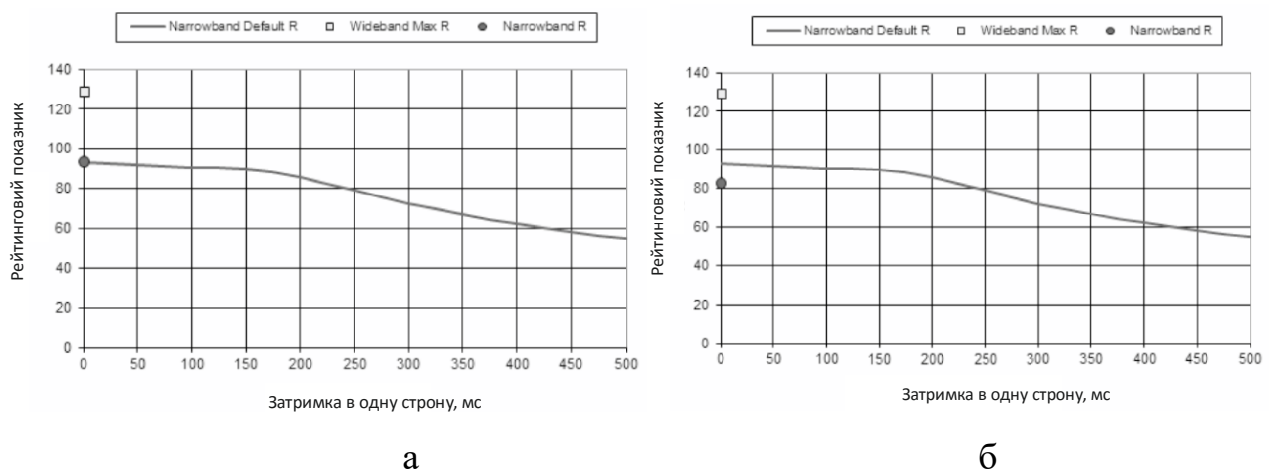


Рис. 4.16. Рейтинговий показник 93.2 при RLR=2 (а) та 82.6 при RLR=10 (б)

Очевидно, що використання високошвидкісних кодеків (G.711 з номінальною швидкістю передавання 64 кбіт/с) дає змогу отримати вищу оцінку MOS. Менш швидкісні кодеки (GSM FR, G.723.1 5.3К, and G.729A) знижують оцінку MOS, про що свідчать дані з табл. 4.2.

Таблиця 4.2

## Результати моделювання якості сприйняття послуг

Кодек VoIP	Ширина смуги пропускання каналу	
	MOS при 1.4 МГц	MOS при 20 МГц
GSM FR	2.39	3.49
G.729 A	3.01	3.03
G.723.1 5.3К	2.5	2.51
G.711	3.62	4.64

## 4.4.2. Дослідження параметрів QoE у процесі відеотрансляції

Аналіз продуктивності та моделювання було здійснено за наступними припущеннями:

- eNodeB забезпечує 3 типи схем модуляції та кодування, а також зони їх застосування, визначені у табл. 4.3;
- мобільні станції рівномірно розподілені у межах комірки;
- відео кодується з використанням SVC (scalable video coding) зі швидкістю кодування  $R_s = 512 \text{ кбіт} / \text{с}$ ;
- кількість шарів відео не більша від кількості типів схем модуляції та кодування;
- не враховуються втрати у шарах Scalable Video.



Таблиця 4.3

## Сигнально-кодові конструкції, застосовані у моделі

Тип СКК	Модуляція	Швидкість коду	Інф. біт/символ	С/Ш(дБ)	Відстань (км)
1	QPSK	1/2	1	0,61	1,58
2	QPSK	3/4	1,5	2,7	1,44
3	16QAM	1/2	2	6,528	1,31

При використанні зв'язку типу точка-точка, відповідний рівень МС для передачі відеоінформації визначається залежно від стану каналу до приймача. З цієї причини, приймачі з низьким співвідношенням сигнал/шум на своєму вході обирають порівняно низький рівень СКК і обмежують швидкість багатоадресного передавання. У зв'язку з цим приймачі отримують справедливі частки пропускної здатності, але вона не забезпечує у багатьох випадках достатньої якості сприйняття послуг.

З іншого боку, ефективність відеотрансляції не вимірюється пропускною здатністю, як при звичайному передаванні даних. Тому ефективність трансляції відео потоку залежить від якості сприйняття послуги (QoE).

В табл. 4.4 і 4.5 зведено оптимальні результати розподілу ресурсів із максимізованим та пропорційно-справедливим QoE відповідно для різних символічних швидкостей і кількостей шарів відео.

Наприклад, якщо доступна швидкість передачі символів 200 ксим/с, формуємо для його трансляції групову багатошарову сесію, і отримуємо максимальну середню QoE рівню 0,65 за умови, що:

- кількість відео шарів становить 3;
- швидкості кодування основного шару 142 кбіт/с і шару покращення 63 кбіт/с та 32 кбіт/с відповідно;

- швидкість передачі символів для базового шару встановлена на рівні 142 ксим/с і застосовується перший тип СКК (QPSK модуляція і швидкість кодування 1/2);
- для першого шару покращення встановлена символна швидкість 42 ксим/с і застосовано другий тип СКК (QPSK модуляція і швидкість кодування 3/4);
- для другого шару покращення встановлена символна швидкість 16 ксим/с і застосовується третій тип СКК (16QAM модуляція і швидкість кодування 1/2);
- 18% приймачів отримують тільки базовий шар з QoE 0,37, 14% приймачів отримують базовий і перший шарпокращення з QoE 0,62, а 68% отримують всі шари з QoE 0,73.

Таблиця 4.4

Результати розподілу ресурсів із максимізованим QoE для різних символних швидкостей і кількостей шарів відео

Символьна швидкість відео (ксим/с)	Шар відео	Швидкість кодування	Тип СКК	символьна швидкість	QoE	Користувачі, %	Середнє значення QoE	Показник справедливості
120	1	240	3	120	0,73	68	0,50	0,68
200	3	32	3	16	0,73	68	0,65	0,92
	2	63	2	42	0,62	14		
	1	142	1	142	0,37	18		
280	3	22	3	11	0,88	68	0,85	0,98
	2	30	2	20	0,83	14		
	1	249	1	249	0,76	18		

У порівнянні з випадком максимізації QoE, PF стратегія розподілу QoE стимулює спільне використання відеопотоку ширшим колом користувачів

шляхом поділу цього відеопотоку на більшу кількість шарів, завдяки чому досягається покращення рівня справедливості, як показано в табл. 4.5.

У випадку обмеження пропускної здатності до 120 ксим/с, стратегія максимізації QoE формує одношаровий відеопотік і охоплює тільки 68% користувачів. При цьому використовуємо 3 тип СКК. З іншого боку, алгоритм PF ділить ресурси на 3 шари і охоплює 100% користувачів шляхом адаптації СКК нижчих рівнів на шари 1, 2 і 3, щоб отримати більше охоплення. Отже, кожен з 18% отримує відео з шару 1 при швидкості передачі даних 80 кбіт/с, кожен з 14% користувачів отримує дані з обох шарів 1 і 2 з сукупною швидкістю даних 114,6 кбіт/с, кожен з решти користувачів може отримувати дані з шарів 1, 2, 3 зі швидкістю 148,5 кбіт/с. У цьому випадку за рахунок зниження QoE на 34%, PF алгоритм дає можливість отримати 21% приросту в справедливості розподілу.

Для аналізу множини можливих компромісів між QoE і справедливістю розподілу розглянемо ідеальні умови поширення в каналі ( $C_1 = 6, C_2 = 2$ ).

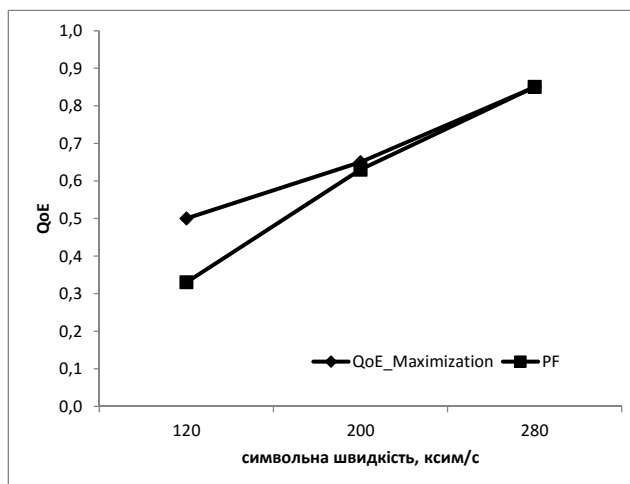
На основі запропонованої моделі передавання відеотрафіку в комірці LTE проведено дослідження ефективності стратегій максимізації QoE та забезпечення пропорційно-справедливого розподілу ресурсів (рис. 4.17).

У зашумленому каналі каналі QoE зростає дуже повільно зі збільшенням швидкості, коли значення цієї швидкості є нижчим за певний пороговий рівень або вищим за інший поріг, як показано на  $S$ -подібній кривій у дисертаційній роботі. У цих межах значення QoE, які залежать від швидкості надходження відеоданих, слабо відрізняються, тому стратегія виділення ресурсів впливає на QoE несуттєво.

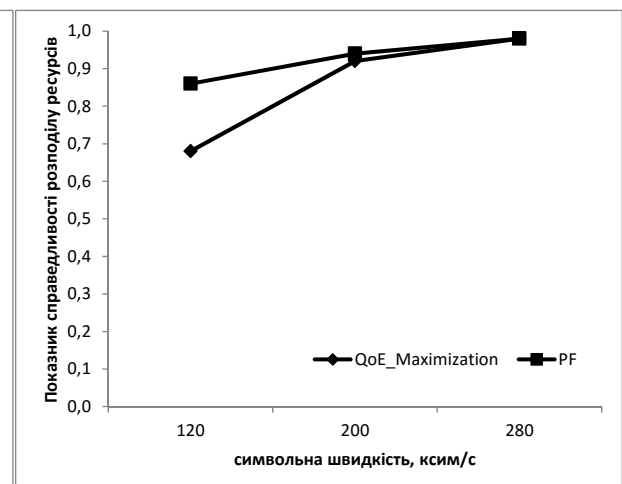
Таблиця 4.5

Результати розподілу ресурсів із пропорційно-справедливим QoE для різних символічних швидкостей і кількостей шарів відео

Символьна швидкість відео (ксим/с)	Шар відео	Швидкість кодування	Тип СКК	символьна швидкість	QoE	Користувачі, %	Середнє значення QoE	Показник справедливості
120	3	34	3	17	0,40	68	0,33	0,86
	2	34,5	2	23	0,26	14		
	1	80	1	80	0,14	18		
200	3	28	3	14	0,69	68	0,63	0,94
	2	36	2	24	0,59	14		
	1	162	1	162	0,45	18		
280	3	22	3	11	0,87	68	0,85	0,98
	2	25,5	2	17	0,83	14		
	1	252	1	252	0,77	18		



а



б

Рис. 4.17. Баланс між QoE та показником справедливості розподілу ресурсів (для умов каналу  $C_1 = 6, C_2 = 2$ )

## Висновки до четвертого розділу

На основі результатів, отриманих у розділі, досягається підвищення QoS та продуктивності мережі за параметрами CQI. Також проведено дослідження стратегії звітності UE щодо CQI з вибором відповідної MCS, яка забезпечує  $\text{BLER} \leq 10\%$  на основі вимірювання співвідношення сигнал/шум на вході приймача. Це дослідження демонструє компроміс між високою пропускну здатністю і імовірністю помилки блоку даних (BLER). З вибором модуляції низького порядку eNodeB гарантує більшу імовірність правильної доставки і нижчу швидкість передавання, і навпаки. Система передавання OLSM дає змогу отримати вдвічі більшу пропускну здатність за рахунок погіршення BLER в порівнянні системою з TxD 4x2 ( $10^0$  vs.  $10^{-2}$  для  $\text{SNR} = 5$  дБ). Як видно з результатів дослідження впливу адаптивного діаграмоутворення на пропускну здатність, цей вплив більш очевидний для схем модуляції високого порядку. Наприклад, 16QAM дає змогу отримати збільшення пропускну здатності на 25% за допомогою адаптивного діаграмоутворення.

Максимальна пропускну здатність у смузі 1,4 МГц з використанням одного порту антени і двох OFDM символів, призначених на PDCCH, 64-QAM модуляції з кодовою швидкістю 0,85, становить 3,935 Мбіт/с; в смузі 20 МГц з використанням чотирьох антенних портів, модуляції 64-QAM з кодовою швидкістю 0,85 – 276.32 Мбіт/с. З використанням максимально досяжної кодової швидкості 0,92 може бути досягнута пропускну здатність 299.122 Мбіт/с.

Запропонований метод розподілу ресурсів дає змогу на 30% підвищити справедливість розподілу ресурсів у порівнянні з відомими. Використовуючи алгоритм максимізації відношення сигнал/шум, вирішено задачу виділенням ресурсних блоків всім UE без можливості захоплення ресурсів найближчим UE до eNodeB. Такий розв'язок у роботі отримано з використанням першого типу

розподілу ресурсів із поділом ресурсних блоків на підмножини, які динамічно формуються, а доступ до них надано лише окремим UE.

Встановлено, що використання кодеків з високою швидкістю потоку (кодек G.711 з номінальною швидкістю 64 кбіт/с) дає більш високі значення MOS. Інші низькошвидкісні кодеки (GSM-FR, G.723.1 5.3K і G.729 A) дають більш низькі значення MOS.

Результати, отримані з допомогою запропонованої моделі багат шарової відеотрансляції, дають змогу обрати баланс між двома стратегіями розподілу ресурсів (максимізація QoE та максимізація показника справедливості розподілу ресурсів). Зокрема, для символічної швидкості 120 ксим/с, перша стратегія забезпечує на 34% вищий рівень показника QoE, однак друга стратегія дає змогу на 21% підвищити показник справедливості розподілу ресурсів.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу підвищення якості сприйняття послуг у мережах LTE на основі адаптації радіоканалу, покращення показника справедливості розподілу ресурсів та удосконалення міжрівневої взаємодії сервісної архітектури LTE.

У роботі отримано такі наукові та практичні результати:

1. В процесі визначення параметрів QoE і QoS, можливі втрати оператора і користувача пов'язані з технічною (апаратне та програмне забезпечення) відмовою. Цими параметрами керують із застосуванням таких методів, як планування мережі, резервування QoS, моніторинг та оптимізація QoE і QoS. Аналіз показує, що існує цілий ряд методів для забезпечення якості обслуговування в сервісно-орієнтованій архітектурі LTE, але їх функціональність обмежена або радіо-мережею e-UTRAN або базовою мережею SAE. Отже, запропоновані у дисертаційній роботі моделі та алгоритми повинні забезпечувати координоване управління якістю обслуговування як в площині користувача, так і у площині управління.

2. Проведено дослідження стандартних моделей для покращення пропускної здатності мережі, QoS і QoE за допомогою відповідного методу компенсації, формування діаграми спрямованості, адаптивного показника якості каналу (CQI) і різних методів розподілу ресурсів для різних послуг. На основі цього досягається підвищення QoS та продуктивності мережі за параметрами CQI. Також проведено дослідження стратегії звітності UE щодо CQI з вибором відповідної MCS, яка забезпечує  $BLEP \leq 10\%$  на основі вимірювання співвідношення сигнал/шум на вході приймача. Це дослідження демонструє компроміс між високою пропускною здатністю і імовірністю помилки блоку даних (BLER). З вибором модуляції низького порядку eNodeB гарантує більшу імовірність правильної доставки та нижчу швидкість передавання, і навпаки. Система передавання OLSM дає змогу отримати вдвічі

більшу пропускну здатність за рахунок погіршення BLER в порівнянні системою з TxD 4x2 ( $10^0$  VS.  $10^{-3}$  для SNR = 5 дБ). Як видно з результатів дослідження впливу адаптивного діаграмоутворення на пропускну здатність, цей вплив більш очевидний для схем модуляції високого порядку. Наприклад, 64QAM дає змогу отримати збільшення пропускну здатності на 25% за допомогою адаптивного діаграмоутворення.

3. Запропоновано удосконалену модель формування пропускну здатності з урахуванням впливу збільшення числа портів антени і числа символів OFDM на продуктивність мережі. Максимальна пропускну здатність у смузі 1,4 МГц з використанням одного порту антени і двох OFDM символів, призначених на PDCCH, 64-QAM модуляції з кодовою швидкістю 0,85, становить 3,935 Мбіт/с; в смузі 20 МГц з використанням чотирьох антенних портів, модуляції 64-QAM з кодовою швидкістю 0,85 – 276.32 Мбіт/с. З використанням максимально досяжної кодової швидкості 0,92 може бути досягнута пропускну здатність 299.122 Мбіт/с.

4. Удосконалено метод збільшення пропускну здатності низхідного каналу передавання даних LTE з підтримкою QoS з використанням різних типів розподілу ресурсів. Цей метод розподіляє доступні ресурси низхідного каналу LTE на основі максимальної справедливості, максимального відношення сигнал/шум і пропорційно-справедливого розподілу. Запропонований метод здійснює виділення частотно-часових ресурсів низхідного каналу LTE на основі розподілу ресурсних блоків з використанням нульового типу розподілу ресурсів. Таким чином досягається виділення необхідної пропускну здатності для кожного UE без максимізації загальної продуктивності низхідного каналу LTE. Запропонований метод дає змогу на 30% підвищити справедливість розподілу ресурсів у порівнянні з відомими. Використовуючи алгоритм максимізації відношення сигнал/шум, слід вирішити задачу виділенням ресурсних блоків всім UE без можливості захоплення ресурсів найближчим UE до eNodeB. Такий розв'язок у роботі отримано з використанням першого типу



розподілу ресурсів із поділом ресурсних блоків на підмножини, які динамічно формуються, а доступ до них надано лише окремим UE.

5. Проведено дослідження продуктивності мережі за допомогою QoE і QoS при відеотрансляції з використанням S-кривої, що обрана в якості моделі для встановлення співвідношення між QoE і швидкістю передавання відеопотоку. Для цього розроблено нову багат шарову модель потокової групової відеотрансляції в LTE мережі і запропоновано використовувати стандартну E-модель для розрахунку QoE метрики у разі надання послуги VoIP з використанням середовища OPNET. Встановлено, що використання кодеків з високою швидкістю потоку (кодек G.711 з номінальною швидкістю 64 кбіт/с) дає більш високі значення MOS. Інші низькошвидкісні кодеки (GSM-FR, G.723.1 5.3K і G.729 A) дають більш низькі значення MOS. У випадку обмеження пропускної здатності до 120 ксим/с при передаванні відеотрафіку з використанням запропонованої моделі, стратегія максимізації QoE формує одношаровий відеопотік і охоплює тільки 68% користувачів. При цьому використовуємо 3 рівень СКК. З іншого боку, алгоритм PF ділить ресурси на 3 шари і охоплює 100% користувачів шляхом адаптації схеми модуляції і кодування для забезпечення максимального покриття. Отже, кожен з 18% користувачів отримує відео з шару 1 при швидкості передачі даних 80 кбіт/с, кожен з 14% користувачів отримує дані з обох шарів 1 і 2 з сукупною швидкістю даних 114,5 кбіт/с, кожен з решти користувачів може отримувати дані з шарів 1, 2, 3 зі швидкістю 148,5 кбіт/с. Зокрема, для символної швидкості 120 ксим/с, перша стратегія забезпечує на 34% вищий рівень показника QoE, однак друга стратегія дає змогу на 21% підвищити показник справедливості розподілу ресурсів.

## ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.



APPROVED

By the Head of R&D Dept. Company

Mr. Ali Abdulhafoz Muhsin

"22" / 11 / 2015

ACT of the result implementation of the dissertation paper

by Mr. **HAIDER KHUDHAIR ABBAS AL-ZAYADI**

**"Experience quality increasing for 4<sup>th</sup>G subscribers on the basis of LTE Service Architecture Model"**

We, Horizon Company, give this Act to certify, that some results of the Mr. **HAIDER KHUDHAIR ABBAS AL-ZAYADI** dissertation paper **"Experience quality increasing for 4<sup>th</sup>G subscribers on the basis of LTE Service Architecture Model"** are used in our company to increase the LTE user experience, including the following:

1. The method of resource allocation combining type 0 and type 1 LTE resource allocation allows us to increase the proportional fairness of resource distribution. This is used to cover more users with LTE service. We also certify this method works properly in real-time conditions.
2. The proposed beamforming method for MU-MIMO LTE systems guaranties the throughput increasing by a user at least on 25 %.

The testing of the above methods was made on real LTE equipment and mean square error of the simulation is less than 5%.

Head of R&D Department of Horizon Company,  
Mr. Ali Abdulhafoz Muhsin



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор

ПП "Цифрові технології"

Ганчак З.В.

" 15 "

01

2016 р.

## АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи Хайдер Худхаір Аббас Аль-Заяді "Підвищення якості сприйняття послуг для абонентів мереж 4G на основі моделі сервісної архітектури LTE"

Даний акт складений про те, що у ПП "Цифрові технології" для підвищення якості надання мультимедійних послуг у експериментальній системі мобільного зв'язку використані результати дисертаційної роботи Хайдер Худхаір Аббас Аль-Заяді "Підвищення якості сприйняття послуг для абонентів мереж 4G на основі моделі сервісної архітектури LTE", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- підтверджено, що результати, отримані з допомогою запропонованої моделі багаточислової відеотрансляції, дають змогу обрати баланс між двома стратегіями розподілу ресурсів (максимізація QoE та максимізація показника справедливості розподілу ресурсів), Зокрема, для символічної швидкості 120 ксим/с, перша стратегія забезпечує на 34% вищий рівень показника QoE, однак друга стратегія дає змогу на 21% підвищити показник справедливості розподілу ресурсів;
- використання запропонованого показника справедливості розподілу ресурсів за методом розподілу ресурсів нульового типу дало можливість підвищити справедливість розподілу ресурсів у комірці у середньому на 30%.

Внаслідок перевірки використаних моделей на мережному обладнанні у ПП "Цифрові технології" встановлено, що результати знаходяться в межах п'ятивідсоткового середньоквадратичного відхилення від поданих у дисертаційній роботі.

Провідний інженер

Дрофяк А.М.

**"ЗАТВЕРДЖУЮ"**  
 Проректор з науково-педагогічної  
 роботи  
 Національного університету  
 "Львівська політехніка"  
 доп. Давидчак О.Р.  
 " 08 " 12 2015 р.

**АКТ**  
 про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
**Хайдер Худхаір Аббас Аль-Заяді**  
**«Підвищення якості сприйняття послуг для абонентів мереж 4G на основі  
 моделі сервісної архітектури LTE»**  
 у навчальному процесі кафедри телекомунікацій




Даний акт складений комісією у складі:

- д.ф.-м.н., проф. Убізський С.Б., голова методичної ради Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- к.т.н., доц. Озірковський Л.Д., декан базової вищої освіти Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., проф. Климаш М.М., завідувач кафедри телекомунікацій

про те, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати кандидатської дисертаційної роботи «Підвищення якості сприйняття послуг для абонентів мереж 4G на основі моделі сервісної архітектури LTE», а саме:

- модернізовано курс лекцій з дисципліни «Технології мереж мобільного зв'язку».

Члени комісії:

	_____	Убізський С.Б.
	_____	Озірковський Л.Д.
	_____	Климаш М.М.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Komada Paweł. Throughput Physical Layer Analysis of LTE / Paweł Komada, Haider Al-Zayadi, S. Olszewski, M. Reznikov, Mushtaq Talib Al-Shuraifi // *Electronics: Products, Technologies, Applications*. – 2013. – № 8. – pp. 63 – 66. (CrossRef, DOI).
2. Al-Shurayfi Mushtaq Talib. Improving Throughput Network Using MIMO-Beamforming / Al-Shurayfi Mushtaq Talib, Al-Zayadi Hayder Hudhair, Mykhaylo Reznikov, Yuriy Khlaponin // *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 2014, vol. 20, issue 1, P. 12-16. (UlrichsWeb, РИНЦ, WorldCat).
3. Klymash M.M. Improving Throughput Using Channel Quality Indicator in LTE Technology / M.M. Klymash, Haider Abbas Al-Zayadi, O.A. Lavriv // *Наукові праці ДонНТУ. – Серія: обчислювальна техніка та автоматизація. – 2014. – №1 (26) 2014. – С. 134-143. (РИНЦ)*
4. Al-Shuraifi Mushtaq. How to Improve Bit Error Rate and Throughput by Resource Management and Affect it on Quality of Service and Modulation and Coding Schemes in Resource Block for LTE / Al-Shuraifi Mushtaq, Mikhail Reznikov, Al-Zayadi Haider // *Електроніка та зв'язок. – № 3. – 2014. – С. 112-118. (Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ)*
5. Al-Zayadi H.A. Mobility Affected on Channel Estimation Using Different Modulation in LTE [Електронний ресурс] / H.A. Al-Zayadi, M.M. Klymash, O.A. Lavriv, M. Al-Shuraifi // *Проблеми телекомунікацій. – 2014. – № 2 (14). – С. 30 - 41. – Режим доступу: [http://pt.journal.kh.ua/2014/2/1/142\\_lavriv\\_lte.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2014/2/1/142_lavriv_lte.pdf). (РИНЦ)*
6. Al-Shuraifi Mushtaq. Effected Angular Spread on Beamforming and Transmit Diversity for Indoor and Outdoor / Mushtaq Al-Shuraifi, Haider Al-Zayadi, I.D. Orlevych / *Вісник Національного університету "Львівська політехніка", серія "Радіоелектроніка та телекомунікації". – № 796. – 2014. – С. 22-28. (Index Copernicus, Google Scholar)*

7. Al-Zayadi Haider, Al-Shuraifi Mushtaq, Al-Sharify Talib. SNR Effect on CQI Applying Multiple Antennas in Closed Loop Spatial Multiplexing Mode in LTE Technologies / Haider Al-Zayadi, Mushtaq Al-Shuraifi, Talib Al-Sharify // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – № 6(34). С. 92-97. (Google Scholar).

8. Al-Zayadi Haider. Improve Quality of Service (QoS) Using Equalization Techniques / Al-Zayadi Haider, Samer Salah Thabit // International Journal of Science and Research (IJSR). – Vol.4. – Issue 7. – July 2015. – pp. 707-710. Available with: <http://www.ijsr.net/archive/v4i7/SUB156269.pdf> (Index Copernicus, SJIF)

9. Al-Zayadi Haider. Priority allocation method of the bandwidth downlink of LTE technology / Al-Zayadi Haider, Al-Sharify Mushtaq Talib, Yuriy Khlaponin, AL-Sharify Talib // Наукоємні технології. – Том 26. – №2 (2015). –2015. – С. 166-171. (UlrichsWeb, ПИНЦ Index Copernicus).

10. Al-Zayadi Haider. Ensuring QoE and Fairness of LTE Resource Allocation During Video Streaming / Haider Al-Zayadi // Вісник Національного університету "Львівська політехніка", серія "Радіоелектроніка та телекомунікації". – № 818. – 2015. – С. 231-241. (Index Copernicus, Google Scholar)

11. Effect Type of Modulation on Peak-to-Average Power Ration (PAPR) in 3GPP for OFDMA And SC-FDMA [Al-Shuraifi Mushtaq, Al-Zayadi Haider]: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science Dedicated to the 170th Anniversary of Lviv Polytechnic National University TCSET'2014. – February 25-March 1. – 2014. – Lviv-Slavske, Ukraine. – Publishing House of Lviv Polytechnic. – pp. 478-480.

12. Improve Bit Error Rate Using Equalization Techniques [Al-Zayadi Haider]: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science Dedicated to the 170th Anniversary of Lviv Polytechnic National University TCSET'2014. – February 25-

March 1. – 2014. – Lviv-Slavske, Ukraine. – Publishing House of Lviv Polytechnic. – pp. 516-517.

13. QoE Estimation on the Basis of LTE Service Architecture [Haider Abbas Al-Zayadi, Orest Lavriv, Mykhailo Klymash]: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science Dedicated to the 170th Anniversary of Lviv Polytechnic National University TCSET'2014. – February 25-March 1. – 2014. – Lviv-Slavske, Ukraine. – Publishing House of Lviv Polytechnic. – pp. 590-592.

14. Способи валідації якості обслуговування в безпроводних мережах широкосмугового доступу [Климаш М.М., Хайдер Аббас Аль-Заяді, Осипова М.Б.]: Матеріали 8-ої Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми телекомунікацій – 2014" (ПТ-14). – 22-25 квітня 2014 р. – Київ, Україна. – С. 115-117.

15. Performance Enhancement of MIMO-OFDM Technology. [Al-Zayadi H. K.]: Матеріали 17-го міжнародного молодіжного форуму "Радиоелектроника и молодежь в 21 веке". Международная конференция "Перспективы развития телекоммуникационных и информационно-измерительных технологий". Харьков, Украина. – том 4. . – 22-24 апреля 2013 г. – С.

16. Effective Type of Modulation For LTE Throughput Increase [Mushtaq Al-Shuraifi, Haider Al-Zayadi , Mykhailo Klymash]: Proceedings of X<sup>th</sup> International Conference "Perspective technologies and methods in MEMS design" MEMSTECH'2014. – 22-24 June 2014. Lviv, Ukraine. pp.

17. Increase Throughput by Expectation Channel Quality Indicator [Haider AL-Zayadi, Orest Lavriv, Mykhailo Klymash, Al-Shuraifi Mushtaq]: Proceedings of the 2014 First IEEE International Scientific-Practical Conference "Problems of Infocommunications: Science and Technology" PIC S&T'2014. – October 14-17, 2014. – Kharkiv, Ukraine. – pp. 120-121.

18. Bandwidth Allocation Problems of LTE Cell Network [Klymash M.M., Shushara Yu.M., Haider Abbas Al-Zayadi]: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції "Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014" (СПТЕЛ-2014). – 30 жовтня-02 листопада 2014 р. – Львів, Україна. – С. 143-144.

19. LTE Channel Capacity and its Influence on the QoE in the Case of Video Transmission [Haider Abbas Al-Zayadi, Mykhailo Klymash]: Proceedings of the XXII Ukrainian–Polish conference CADMD’2014. – October 10-11, 2014. – Lviv, Ukraine. – pp. 118-121.

20. The Problem of Downlink Channel Bandwidth Capacity Allocation in LTE Technology [H. Al-Zayadi]: Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET’2016. – February 23-26. – 2016. – Lviv-Slavske, Ukraine. – Publishing House of Lviv Polytechnic. – pp. 940-942.

21. Improving QoS in MAX C/I Scheduling Using Resource Allocation Type 1 of LTE [Mushtaq Al-Shurafi, Haider Al-Zayadi, Orest Lavriv, Mykhailo Klymash] Proceedings of the XIII<sup>th</sup> International Conference "The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics" (CADSM'2015). – 24-27 February 2015. – Polyana-Svalyava. – pp. 12-14.

22. Effected VOIP Service by Means Subjective Method Using MOS in LTE Network [Haider Al-Zayadi, Mushtaq Al-Shuraifi, Talib Al-Sharify, Zainab Al-Sharify] 5<sup>th</sup>Annual BEAR PGR. – 15<sup>th</sup> December 2014. – Birmingham, UK. pp. 47-57.

23. QoE-based Monitoring of LTE Networks [Al-Zayadi Haider, Koval Bohdan] Proceedings of the 2015 1<sup>st</sup> International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015). – Lviv. – Ukraine. – October 29 – November 1. – 2015, С. 53-54.



24. Mehdi Alesti, Quality of Service in WiMAX and LTE Networks// Mehdi Alasti and Behnam Neekzad, Clearwire Jie Hui and Rath Vannithamby - Intel Labs, IEEE Communications Magazine, 2010. – 225 с.

25. Гельгор А.Л. / Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие // А.Л. Гельгор, Е.А. Попов - СПб.: Политехн. ун-та, 2011. - 204 с.

26. [Электронный ресурс] Defining Mobile User Experience – QoE&QoS. <http://www.telecom-cloud.net/defining-mobile-user-experience-qoe-qos/>

27. [Электронный ресурс] Исследование параметров качества обслуживания (QoS), определяющих качество восприятия пользователем (QoE) потокового видео при передаче через Интернет. <http://rus.neicon.ru:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/14703/st-7.pdf?sequence=1>

28. Fei Liu,/ A Novel QoE-Based Carrier Scheduling Scheme in LTE-Advanced Networks with Multi-Service// Wei Xiang, Yueying Zhang, - Program for New Century Excellent Talents in University (Grant No. NCET-11-0600), and Graduate Innovation Fund of HUAXING CHUANGYE & SICE, BUPT, 2011.

29. Martin Wrulich,/ System level simulation of LTE networks// Vienna University of Technology, Austria, IEEE – 2010.

30. Andrei Vasile Iordache,/ LTE Downlink Performance// Faculty of Electronics, Telecommunications and Information, University POLITEHNICA University Politehnica Bucharest, Romania, IEEE – 2012.

31. R. Barco,/ Estimation of Link-Layer Quality Parameters in a System-Level LTE Simulator// University of Malaga, Communications Engineering Dept., Malaga, Spain, IEEE – 2010.

32. Motorola, «Long Term Evolution (LTE): Overview of LTE Air-Interface», Technical White Paper, 2007

33. ETSI TR 136 942 V10.2.0 (2011-05) «LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios(3GPP TR 36.942 version 10.2.0 Release 10)»

34. Rohde & Schwarz. UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction. Rohde & Schwarz Products C.Gessner 03.2007., p.17-22.
35. Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold and Per Beming. 3G Evolution. HSPA and LTE for Mobile Broadband. Second edition. Academic Press is an imprint of Elsevier. Burlington, MA.- 2008., p.300-316.
36. Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker. LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice. Second Edition. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. Great Britain.-2011., p.217-249.
37. Farooq Khan. LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance. Cambridge University Press, New York.- 2009., p.291-342.
38. Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker. LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. Great Britain.-2009., p.207-239.
39. Lee, Juho, Han, Jin-Kyu, and Zhang, Jianzhong (Charlie), (2009), “MIMO Technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Volume 2009, pp. 1-10.
40. A Mathematical Theory of Communications. Shannon, C. E. Vols. Bell Systems Technical Journal, vol. 27, 1948, pp. 379-423 and 623-656.
41. Y. G. Li, N. Seshadri, and S. Ariyavisitakul, "Channel estimation for transmitter diversity in OFDM systems with mobile wireless channels," IEEE J. Selected Areas Commun., vol. 17, pp. 461-471, March 1999
42. Mehlführer, C., Caban, S., Wrulich, M., and Rupp, M., (2008), “Joint throughput optimized CQI and precoding weight calculation for MIMO HSDPA”, 2008 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, 26-29 Oct., 2008, pp. 1320-1325.
43. D. Falconer, “Frequency Domain Equalization for Single-carrier Broadband Wireless Systems,” IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 4, April 2002, pp.58–66.

44. S. B. Weinstein and P. M. Ebert, "Data Transmission by Frequency Division Multiplexing 634, Using Discrete Fourier Transform," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 19, no. 5, pp. 628–October 1971
45. A. Paulraj, D. Gore, R. Nabar, and H. Bolcskei. An overview of MIMO communications - a key to gigabit wireless. In *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, pp. 198–218, Feb. 2004.
46. G. L. Stuber, J. R. Barry, S.W.McLaughlin, Y. Li,M. A. Ingram, and T. G. Pratt. Broadband MIMO-OFDMwireless communications. In *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, pp.271– 294, Feb. 2004.
47. K. Ogawa, Y.and Nishio, T. Nishimura, and T. Ohgane. A mimo-ofdm system for high speed transmission. In *IEEE 58th Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp.493– 497, 2003.
48. H. Sampath, S. Talwar, J. Tellado, V. Erceg, and A. Paulraj. A fourth-generation MIMOOFDM broadband wireless system: design, performance, and field trial results. *IEEE Communications Magazine*, 40(9):143–149, Sep. 2002.
49. "Techniques for adaptive equalization of digital communication systems", R.W.Lucky, in *Bell System Technical Journal*, vol. 45, pp. 255–286, Feb. 1966.
50. V.Jagan Naveen, K.Murali Krishna, K.RajaRajeswari, "Performance analysis of equalization techniques for MIMO systems in wireless communication", *International Journal of International Journal of Smart Home Smart Home Smart Home*, Vol.4, No.4, October, 2010, page 47-62.
51. Al-Zayadi Haider. Master thesis. Parameters of affective LTE by using methods of equalization in microwave of system communications. *Kharkiv National University of Radioelectronic. Ukraine.*, - 2013, p. 88-94.
52. W. M. Eddy. At what layer does mobility belong. *IEEE Communications Magazine*, 42(10):155 – 159, 2004.
53. ITU. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. The E-model, a computational model for use in

transmission planning. International telephone connections and circuits – General definitions.G-107. -03.2005., p. 1-20.

54. Leila shyanpour Master thesis. QOE base application mapping for resource management. University of electrical and computer engineering university Toronto.- 2010, P. 23-26

55. ITU. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Estimating end-to-end performance in IP networks for data applications. Quality of service and performance – Generic and user related aspects.G-1030. -11.2005., p. 1-20.

56. ITU. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. The E-model, a computational model for use in transmission planning. International telephone connections and circuits.G-107. - 12.2011., p.1-18.

57. White paper. TD-LTE and MIMO Beamforming Principles and Test Challenges. SPIRENT, CA, USA. – Aug.2012, p.7-12.

58. Bruno Clerckx. Interference management in wireless networks: Practice and Theory. Imperial College London. Eurecom, May 2013.- p.3-44.

59. H. Rohling and R. Gruneid, “Performance comparison of different multiple access schemes for the downlink of an OFDM communication system”, in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 3, Phoenix, AZ, USA, May 1997, pp. 1365–1369.

60. T. Pollet, M. Van Bladel and M. Moeneclaey, “BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise,” IEEE Trans. on Comm., Vol. 43, No. 2/3/4, pp. 191-193, Feb.-Apr., 1995.

61. P. H. Moose, “A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction,” IEEE Trans. on Comm., Vol. 42, No. 10, pp. 2908-2914, Oct., 1994.

62. T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. on Comm.*, Vol. 45, No. 12, pp. 1613-1621, Dec., 1997.
63. A. Seeger, A. Lobinger, R. Wiedmann, and B. Raaf, "Downlink eigenbeamformer with combining of eigenbeams", in *Proc. IEEE Global Communications Conference GLOBECOM*), vol. 5, San Antonio, TX, USA, November 2001, pp. 1269–1273.
64. Alard M., Lassalle R. Principle of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers // *EBU Review – Technical*. 1987. – No.224. – pp. 168–190.
65. Goldsmith A. *Wireless communication*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 561 p
66. R. Lupas and S. Verdu. ' Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple access channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 35(1):123–136, January 1989
67. Tryggvi Ingason, Liu Haonan *Line-of-Sight MIMO for Microwave Links Adaptive Dual Polarized and Spatially Separated Systems*. Göteborg, Sweden, 2009.– p.117.
68. V. Pammer, Y. Delignon, W. Sawaya, and D. Boulinguez, "A low complexity suboptimal MIMO receiver: the combined ZF-MLD algorithm," *IEEE PIMRC 2003*, pp. 2271-2275, Sept. 2003.
69. X. Li and X. Cao, "Low complexity signal detection algorithm for MIMO-OFDM systems," *IEE Electronics Letters*, vol. 41, no. 2, Jan.2005.
70. Korn I. *Digital Communications*. Van Nostrand Reinhold Company, Inc., New York, 1985.–676 p.
71. PCTEL, Inc. White Paper, Maximizing LTE Performance Through MIMO Optimization,USA, April 2011,P.1-14
72. Matthew Baker,3GGP "LTE-Advanced Physical Layer",2009,P.3-43

73. Jim Zyren, Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer. White Paper, 07/2007,P. 7-12
74. 3GPP TS 36.211 version 10.3.0 Release 10 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation .P.10-15
75. C. E. Shannon. A mathematical theory of communications. Bell Sys. Tech. Journal, 27: 379–423, 623–656, 1948.
76. Capacity of Multiantenna Gaussian Channels. Telatar, E. s.l. : European Transactions on Telecommunications, , November/December 1999, Vols. vol. 10, No. 6, pp.585-595.
77. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. Gans, G. J. Foschini and M. J. 1998, Vols. Wireless Personal Communications, vol. 6, 1998, pp. 311-335.
78. G. J. Foschini, and M. J. Gans, “On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas,” Wireless Personal Communications, Vol. 6, 1998, pp.311–335
79. D. Morales-Jimenez, J. F. Paris and J. T. Entrambasaguas, “Performance tradeoffs among low-complexity detection,” International journal of communication systems Int. J. Commun. Syst. 2009; 22:885–897
80. Nelson Costa and Haykin Simon. “Multiple-Input Multiple-Output Channel Models” . s.l. : John Wiley, 2010.P.-6-34
81. Lei Wan Shiauhe Tsai Almgren, M., A fading-insensitive performance metric for a unified link quality model, Wireless communications and networking conference, IEEE, Apr 2006, pp 2110-2114
82. Hai Jiang, Weihua Zhuang, Xuemin (Sherman) Shen, and Qi Bi, “Quality-of-Service Provisioning and Efficient Resource Utilization in CDMA Cellular Communications”, IEEE journal on selected areas in communications, vol. 24, no. 1, January 2006.P.4-14
83. John G. Proakis, “Digital Communications 5th Edition”, New York, 2008,P.-40-55.

84. H.S. Wang and N. Moayeri, "Modeling, capacity, and joint source/channel coding on Rayleigh fading channels," in Proceedings 43rd IEEE VTC, NJ, USA, 1993, pp. 473–479.
85. Harri Holma and Antti Toskala, HSDPA/HSUPA for UMTS High Speed Radio Access for Mobile Communications, John Wiley and Sons, 2006.
86. Q. Zhang and Kassam S., "Finite-state Markov model for Rayleigh fading channels," IEEE Transactions and Communications, Vol. 47, 1999, pp. 1688–1692.
87. Ghosh A., Zhang J., Muhamed R., Andrews J. Cr. Fundamentals of LTE. USA: Prentice Hall, 2010, 464 p.
88. Гаркуша С.В. Модель распределения блоков планирования в нисходящем канале связи технологии LTE // Грузинский электронный научный журнал: Компьютерные науки и телекоммуникации. – 2013. – Вып. 3(39). – С. 76-94.)
89. Гаркуша С.В., Василенко Ю.А. Модель планирования частотно-временного ресурса в нисходящем канале связи технологии LTE // Научно-технический Вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – Вып. 3(85). – С. 92-98.
90. Iosif O., Banica I. On the Analysis of Packet Scheduling in Downlink 3GPP LTE System // The Fourth International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service (CTRQ 2011). – 2011. – P. 99–102.
91. Kawser M.T., Farid H.M.A.B., Hasin A.R., Sadik A.M.J., Razu I.K. Performance Comparison between Round Robin and Proportional Fair Scheduling Methods for LTE // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2012. – V. 2. – № 5. – P. 678–681.
92. Galaviz G., Covarrubias D.H., Andrade A.G., Villarreal S. A resource block organization strategy for scheduling in carrier aggregated systems // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2012. – P. 107–124.

93. Girici T., Zhu C., Agre J.R., Ephremides A. Proportional Fair Scheduling Algorithm in OFDMA-Based Wireless Systems with QoS Constraints // *Journal of communications and networks*. – 2010. – V. 12. –№ 1. – P. 30–42.

94. 3GPP TS 36.213. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 11). – Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2012.

95. A. Pokhariyal, T. E. Kolding, and P. E. Mogensen. Performance of downlink frequency domain packet scheduling for the UTRAN Long Term Evolution. In *The 17th IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1–5, Sep. 2006.

96. M. Nakamura, Y. Awad, and S. Vadgama. Adaptive control of link adaptation for high speed downlink packet access (HSDPA) in W-CDMA. In *The 5th Wireless Personal Multimedia Communications Conference*, vol. 2, pp. 382–386, Oct. 2002.

97. E. Tuomaala and H. Wang, "Effective SINR approach of link to system mapping in OFDM/multi-carrier mobile network," in *Proc. 2nd International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems 2005*, Nov. 2005.

98. X. He, K. Niu, Z. He, and J. Lin, "Link layer abstraction in MIMO-OFDM system," in *Proc. International Workshop on Cross Layer Design 2007 (IWCLD 2007)*, Sep. 2007, pp.41-44.

99. C. Mehlführer, M. Wrulich, J. Colom Ikuno, D. Bosanska, and M. Rup, "Simulating the Long Term Evolution Physical Layer," in *Proc. EUSIPCO 2009*. pp.1471 – 1478.

100. P. A. Bello, "Characterization of randomly time-variant channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 11, no. 4, pp. 360–393, 1963.

101. Fayssal Bendaoud, Marwen Abdennebi, Fedoua Didi. Survey On Scheduling And Radio Resources Allocation In Lte // *International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN)* Vol.6, No.1, March 2014. – pp 17-29.



102. Garkusha S., Al-Dulaimi A.M.K., Al-Janabi H. D. The Model of Scheduling Block Allocation in Downlink LTE // Proc. of IEEE XXXIV International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology. 15-18 April 2014. – Kyiv, UKRAINE, 2014. – P. 455-459.

103. Garkusha S., Al-Dulaimi A., Al-Janabi H. Result Research Model of Scheduling Block Allocation in Downlink LTE // Proceedings of the XII International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2014), Lviv-Slavske, February 25 – March 1, 2014. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2014. – pp. 498-500.