

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка
до бакалаврської роботи

на тему: “Аналіз основних технічних характеристик телекомунікаційних систем з використанням нечітких класифікаторів”

Виконав: студент 5 курсу, групи РТЗ-51
спеціальності
172 Телекомунікації і радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)
Гармаш М.С.
(прізвище та ініціали)
Керівник (прізвище та ініціали)
Рецензент (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль _____

Київ - 2021

ЗМІСТ

	стр.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ 4-ГО ПОКОЛІННЯ	10
1.1 Порівняння ключових технологій WiMAX і LTE	10
1.2 Аналіз стану мереж за технологією WiMAX	24
1.3 Аналіз стану мереж за технологією LTE	28
2. ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ КЛАСИФІКАТОРІВ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	32
2.1 Самоорганізація моделей складних об'єктів	32
2.2 Обґрунтування доцільності застосування нефізичних моделей за допомогою аналогії з каналом зв'язку	36
2.3 Методика одержання вихідних даних за допомогою об'єднання декількох об'єктів у однорідні класи	37
2.4 Визначення оптимального числа чинників	40
3. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ LTE	42
3.1 Вибір обладнання абонентських станцій	42
3.2 Вибір обладнання базових станцій	45
3.3 Розрахунок споживаної потужності	51
ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	57
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	59

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

3GPP	-	об'єднання з розробки стандартів мобільного зв'язку 3-го покоління
Cdma 2000	-	стандарт мобільного зв'язку 3-го покоління в еволюційному розвитку мереж IS – 95
eNB	-	базова станція стандарту LTE
E-UTRAN	-	мережа радіодоступу стандарту LTE
ETSI	-	європейський інститут телекомунікаційних технологій
FDD	-	дуплекс з частотним поділом напрямків
GERAN	-	мережа радіодоступу стандарту GSM/EDGE
GSM	-	глобальна система мобільного зв'язку
HSPA	-	технологія бездротового широкосмугового радіозв'язку, яка використовує пакетну передачу даних в мережах WCDMA/UMTS
IMS	-	мультимедійна система передачі даних на основі протоколу IP
MIMO	-	технологія передачі даних за допомогою N антен і їх прийому M антенами
OFDM	-	технологія мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів
SAE	-	архітектура ядра мережі, розроблена для стандарту LTE
SC-FDMA	-	множинний доступ ущільнення каналів з частотним рознесенням передачі на одній несучій
TDD	-	дуплекс з тимчасовим поділом напрямків
UMTS	-	універсальна мобільна телекомунікаційна система
WCDMA	-	широкосмуговий множинний доступ з кодовим поділом каналів

ВСТУП

Системи передачі даних з кожним роком стають більш досконалішими. Сучасний світ неможливо представити без швидкісних систем ШСД, систем передачі даних та звісно без мереж мобільного зв'язку. Технології 4-го покоління (WiMAX та LTE) – це не лише еволюція знайомих нам систем зв'язку 3-го покоління, а і інновації для ведення бізнесу, навчання, роботи з інформаційними ресурсами та мережею Інтернет. Проте, перш за все це крок у технологічне майбутнє, де кожен персональний гаджет (смартфон, нетбук, Smart watch, тощо) є повноцінним комп'ютером, здатним не тільки виконувати своє основне призначення, а і взаємодіяти як з технікою так і з людиною. Яскравим прикладом такої взаємодії є взаємозв'язок електроніки і людини, який проявляється через аналіз життєво важливих показників людського тіла та їх подальший аналіз за допомогою програмного забезпечення на смарт-девайсі. Однак, для подальшого технологічного розвитку не достатньо розвивати гаджети, необхідним є розвиток середовища, в якому всі девайси могли б працювати синхронно і з мінімальним втручанням людини. Одним з напрямків розвитку такого середовища є перехід від систем 3-го покоління до 4-го. І саме ключові технології WiMAX та LTE – є ідеальним прикладом таких інновацій.

Системи 4-го покоління - це достатньо відомі технічні рішення, проте розгортання таких систем завжди складний та ресурсозатратний процес. В більшості випадків не достатньо простої зміни одного блоку/модуля на базовому обладнанні на нове, виникають проблеми сумісності, продуктивності, і, головне, раціональності впровадження тої чи іншої технології. Саме тому питанням організації радіомереж приділяється значна увага, адже при неправильному виборі система зв'язку може не лише не працювати максимумі своїх можливостей, але і буде збитковою для оператора.

1. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ 4-ГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Порівняння ключових технологій WiMAX і LTE

Візьмемо до порівняльного аналізу ключові технології 4-го покоління. Перша – LTE, запропонована міжнародною організацією 3GPP (3-rd Generation Partnership Project), і друга – WiMAX, ініціаторами якої виступив WiMAX Forum. На даний момент – це дві, свого роду, конкуруючі технології, проте спільного в них досить багато. В першу чергу – це технології, які були покладені в їх основу.

Визначимо найбільш вагомі серед них:

- ортогональне частотне розділення каналів з мультиплексуванням (OFDM);
- технологія передачі даних за допомогою «множинних» антен MIMO, а також адаптивні антенні системи (AAS).

В таблиці 1 приведена порівняльна характеристика за їх основними параметрами.

У сучасному інформаційному світі мобільні технології відіграють роль прискорювача розвитку економіки і переходу до нового рівня якості життя людей. Усі сучасні технології безпроводного зв'язку нині рухаються в одному напрямі - до систем на базі OFDM - MIMO і далі до систем 5-го покоління. Ключові особливості радіоінтерфейсу сучасних систем радіодоступу WiMAX і LTE заключаються в тому, що обидві технології базуються на одному і тому ж радіоінтерфейсі MIMO - OFDM. Для визначення наявних між ними відмінностей необхідно розглянуть принципи організації радіоінтерфейсу, а саме:

- багатостанційний доступ;
- організація каналних ресурсів;

- контроль частотних ресурсів;
- адаптація системи до характеристик каналу;
- керування потужністю;
- коефіцієнт повторного використання частот;
- схеми MIMO;
- оцінка ємності соти;
- оцінка радіопокриття.

Технології LTE і WiMAX використовують схожі радіотехнології, але для застосування на рухомих об'єктах перша має переваги:

- коефіцієнт повторного використання частот в WiMAX дорівнює 3, а у LTE - 1 (чим менше коефіцієнт, тим вища спектральна ефективність);
- затримка на обробку пакетів в WiMAX дорівнює 30 мс., а у LTE - 10 мс. (це досягнуто за рахунок спрощеної архітектури мережі LTE);
- адаптація системи до каналу в WiMAX - груба настройка (2-3 дБ), а у LTE - висока точність (1-2 дБ) (адаптація системи із високою точністю підвищує спектральну ефективність).

Виходячи з отриманих результатів проведеного аналізу двох широкосмугових стандартів систем 4-го покоління можна зробити висновок, що характеристики радіопокриття і ємність мережі LTE значно вищі ніж відповідні характеристики WiMAX.

З погляду операторів зв'язку найбільший інтерес у цей час представляють мережі PAN, LAN і MAN. У цей час для реалізації мереж цих масштабів існують технології доступу WiMax (стандарт IEEE 802.16) та LTE (Long-Term Evolution – довгостроковий розвиток), тобто технології доступу четвертого покоління.

Основні параметри WiMax і LTE

Технологія	WiMax	LTE
Рік виходу	2004	2006
Архітектура, протокол	Архітектура проста. Протокол «точка-точка» «точка-мультиточка»	Архітектура складна. Нестандартні протоколи.
Міграція від 3G	Потрібна суттєва заміна обладнання	Потрібна суттєва заміна обладнання
Діапазон	1,5...11 ГГц	700 МГц...3,6ГГц

Стандарт IEEE 802.16 визначає функціонування двох нижніх рівнів моделі OSI – фізичного (PHY) і канального (доступу до середовища передачі MAC) як у площині даних, так і управління. Площина даних визначає, яким чином здійснюється інкапсуляція і деінкапсуляція інформації на рівні MAC і модуляція/демодуляція на фізичному рівні. Різні конфігурації та операції підтримуються набором контрольних функцій. Площина управління визначає процедури класифікації, безпеки, якості обслуговування, а також встановлення з'єднання.

На рис.1 представлена рівнева модель стандарту IEEE 802.16. Рівень MAC поділений на три підрівні:

- «підрівень узгодження або конвергенції» (Convergence Sublayer, CS): відповідає за проектування вимог протоколів вищого рівня та конфігурації системи в примітиві другого підрівня CPS;
- «загальний підрівень MAC» (Common Part Sublayer, CPS): складає ядро MAC – рівня і регламентує процедуру доступу до середовища передачі, управління з'єднанням, розподілу пропускнуої здатності відповідно до вимог типу сервісу, якістю обслуговування (QoS) і т.д.– незалежно від підрівня CS;

- «підрівень захисту» (Privacy Sublayer, PS): призначений для шифрування даних в ефірі, авторизації користувача пристроїв та перевірки достовірності сертифікатів.

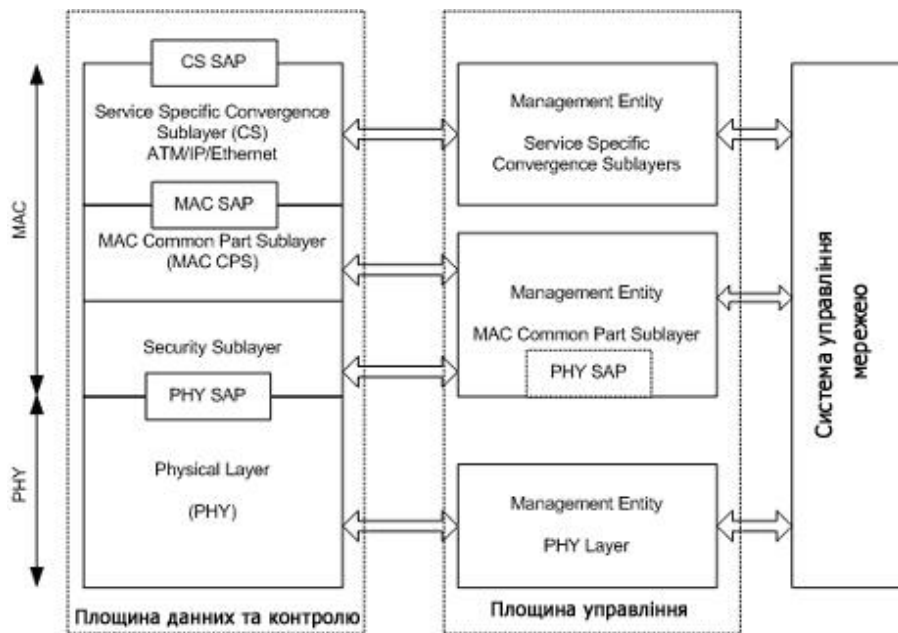


Рис. 1.1 Рівнева модель стандарту IEEE 802.16

Площина управління складається з чотирьох підрівнів, відповідних підрівням площини даних і фізичного рівня. Стандарт IEEE 802.16 не визначає деталі площини управління. Специфікації інтерфейсів і повідомлень визначаються поправками, наприклад, IEEE 802.16g визначає процедури і послуги площині управління.

Стандарт IEEE 802.16 визначає п'ять сервісів якості обслуговування:

- UGS (Unsolicited Grant Service) – при створенні з'єднання з даним сервісом в картах висхідного і низхідного потоків гарантовано виділяється необхідний час для забезпечення встановленої пропускної спроможності. У користувацького пристрою відсутня необхідність передавати запити пропускної здатності за винятком запиту на створення з'єднання. Використовувати цей сервіс передбачається для потоків трафіку реального часу з фіксованою швидкістю, наприклад для передачі потоків E1;

- RTPS (Real Time Polling Service) – запити на надання смуги пропускання виробляються протягом всієї тривалості з'єднання, але для них виділено персональний час, тобто для користувацького пристрою в кожному кадрі виділяється час на передачу запитів, що дозволяє уникнути колізій в загальному інтервалі. Про застосування говорить назва самого сервісу – потоки з динамічно змінюючимися вимогами до пропускну здатності, але критичні до затримок передачі. Типовим прикладом може служити MPEG відео;

- ERTPS (Extended Real Time Polling Service) – є розширенням рівня сервісу RTPS. Призначений для передачі трафіку VoIP з придушенням пауз (визначено тільки в IEEE 802.16e);

- NRTPS (None Real Time Polling Service) – запити про пропускну здатність дозволені як у складі кадрів з корисним навантаженням, так і протягом загального інтервалу на початку кожного кадру висхідного потоку. Сервіс дозволяє створювати канали з мінімальною гарантованою пропускну здатністю і застосовується для різних типів Інтернет трафіку, не висуваючи жорсткі вимоги до значень параметрів якості обслуговування, наприклад FTP;

- BE (Best Effort) – передача запитів вирішена виключно протягом загального інтервалу. Будь-які гарантії повністю відсутні. Даний вид сервісу допускає наявність тимчасових затримок доставки пакетів.

До четвертого покоління прийнято відносити перспективні технології, що дозволяють здійснювати передачу даних зі швидкістю, що перевищує 100 Мбіт/с рухливим і 1 Гбіт/с – стаціонарним абонентам. Тобто, LTE базується на трьох основних технологіях: мультиплексування за допомогою ортогональних OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) носівних, що транслюються за допомогою багатопроменевих систем MIMO (Multiple Input Multiple Output) та на еволюційній системній архітектурі мережі SAE (System Architecture Evolution). Зміст технології MIMO заключається в тому, що передавальні і приймальні антени рознесені так, щоб досягти слабкої кореляції між сусідніми антенами. Це важливо для сучасних систем доступу на базі LTE, котрі вимагають здійснення

максимальних швидкостей передачі інформації в порівнянні з іншими технологіями.

У сучасних безпроводних мережах передавання даних, побудованих на основі технологій LTE / LTE-Advanced, використовують різновиди фазової та амплітудно-фазової маніпуляції. Розглянемо характеристики модуляції, що впливають на якість та ефективність безпроводних мереж. До найвживаніших модуляцій належить КФМн, для якої кількість комбінацій модулювальних інформаційних сигналів, за яких одержують неповторювані КФМн-сигнали (а отже і кількість символів), дорівнює $M = 4$. При цьому за час передавання одного інформаційного символу може бути передано $\log_2 4 = 2$ біти інформації. КФМн-сигнал (В) представляють у вигляді суми двох ортогональних складових – косинусоїдальної (синфазної) та синусоїдальної (квадратурної). Сигнальне сузір'я КФМн-сигналу представлено на рис. 1.2, а (d – мінімальна відстань між сигнальними точками). Якщо необхідно передавати більше інформації протягом одного інформаційного такту, тоді застосовують амплітудно-фазомодульовані сигнали, зокрема М-КАМ [4, 9]. М-КАМ-сигнал (В) подають у вигляді суми двох ортогональних складових – синфазної та квадратурної, але, на відміну від КФМн, модулювальні сигнали $umI(t)$, $umQ(t)$ є не дворівневими, а багаторівневими. Кількість комбінацій модулювальних інформаційних сигналів, за яких отримують неповторювані М-КАМ-сигнали (а значить і кількість можливих символів), становить:

$$M = (MU)^2, \quad (1.1)$$

де MU – кількість можливих рівнів амплітуди модулювальних сигналів.

При цьому протягом тривалості одного інформаційного символу може бути передано $\log_2 M$ біт інформації. Сигнальні сузір'я деяких КАМ-сигналів зображені на рис. 2, б – г.

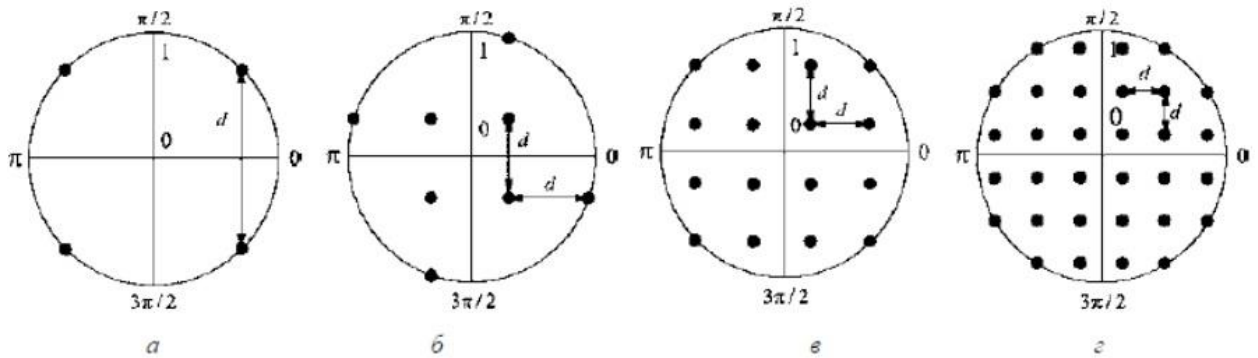


Рис. 1.2 Сигнальні сузір'я: *a* - КФМн; *б* – 8КАМ; *в* – 16-КАМ; *г* – 32-КАМ

Для підвищення якості й ефективності безпроводних мереж передавання даних запропоновано використовувати нову сім'ю модуляцій на основі АМБС (amplitude modulation of many components – АММС). АМБС-сигнал формують у вигляді суми N модульованих за амплітудою гармонічних складових, що відрізняються початковими фазами φ_n . До такої сім'ї модуляцій, крім традиційної АМБС, належить запропонована амплітудна маніпуляція багатьох складових (АМНБС, amplitude shift keying of many components – АСКМС), під час здійснення якої модульовальні сигнали є дискретними. Іншим різновидом запропонованої сім'ї модуляцій є М-АМБС зі зсувом модульовальних сигналів один відносно одного в часі (M-ary offset amplitude modulation of many components – М-ОАММС). Із практичного погляду заслуговує на увагу АМБС-сигнал, що формують у вигляді суми складових, зсунутих між собою на фазові кути. Загальна кількість символів, що можна отримати з використанням усіх можливих комбінацій модульовальних інформаційних сигналів за довільних початкових фаз складових АМБС-сигналу.

Технологіям LTE Advanced (LTE-A) і Mobile WiMAX Release 2 (також відомим, як WirelessMAN-Advanced або IEEE 802.16m) присвоєно офіційне позначення IMT-Advanced, що дозволяє їх кваліфікувати в якості технологій 4G.

$$M_{tot} = (M_U)^N \quad (1.2)$$

Кількість комбінацій модульовальних інформаційних сигналів, за яких отримують неповторювані АМБС-сигнали (а значить, і ефективну кількість символів), при $N = 3$, початкових фазах складових, що задовольняють, дорівнює:

$$M_{eff} = 3M_U(M_U - 1) + 1, \quad (1.3)$$

а кількість переданої інформації протягом тривалості одного символу становить: $\log_2 M_{eff}$ біт.

Для здійснення АМБС необхідно застосувати модулятор та демодулятор АМБС. Особливістю запропонованих модуляторів і демодуляторів АМБС є можливість формувати й обробляти АМБС-сигнали з найрізноманітнішими сигнальними сузір'ями. При цьому сигнальне сузір'я АМБС-сигналу із N складовими вписується в $2N$ -кутник. Із практичного погляду цікаві сузір'я із трьома та шістьма складовими. Зокрема, сигнальні сузір'я АМБС-сигналів із $N = 3$ складовими й трьома можливими рівнями амплітуди модульовальних сигналів зі зсувом з використанням 8 точок (8-АМБС - зі зсувом), 16 точок (16-АМБС - зі зсувом), а також чотирма можливими рівнями амплітуди модульовальних сигналів у разі використання 32 точок (32-АМБС - зі зсувом) зображені на рис. 3.

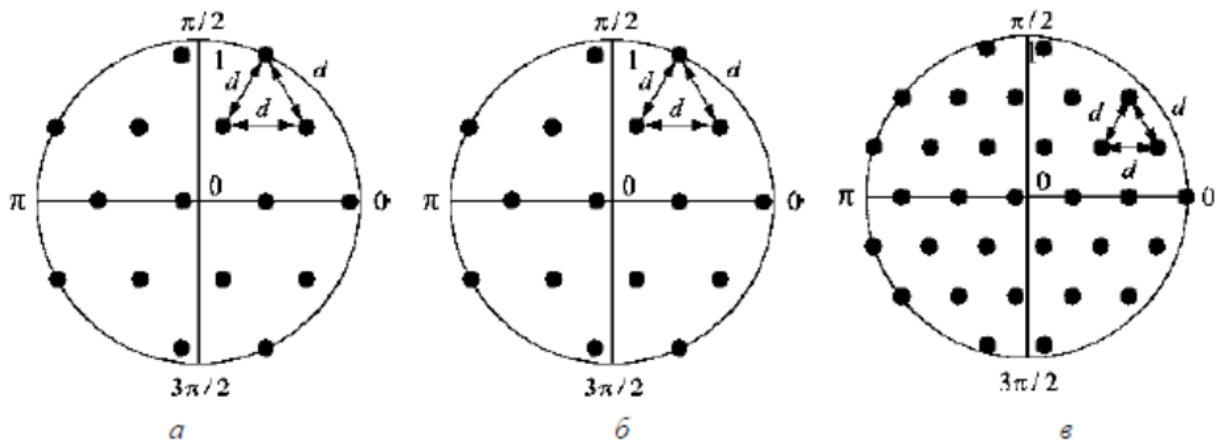


Рис. 1.3 Синальні сузір'я: *a* – 8-АМБС зі зсувом; *б* – 16-АМБС зі зсувом; *в* - 32-АМБС зі зсувом

Для комплексного оцінювання переваг M -АМБС необхідно провести дослідження ймовірності бітової помилки залежно від застосованого різновиду модуляції та порівняти ці параметри для різних видів модуляції сигналу КФМн (частотна ефективність 2 біт/с/Гц), 8-КАМ (3 біт/с/Гц), 16-КАМ (4 біт/с/Гц) і 32-КАМ (5 біт/с/Гц) з 8-АМБС зі зсувом (3 біт/с/Гц), 16-АМБС зі зсувом (4 біт/с/Гц) і 32-АМБС зі зсувом (5 біт/с/Гц) з однаковою кількістю сигнальних точок.

Обчислення ймовірності бітової помилки у разі використання АМБС-сигналів здійснено згідно із запропонованою формулою:

$$P_{b \text{ АМБС}} \cong \frac{n_m}{\log_2(M_{eff})} \cdot Q_1 \left(\sqrt{K_E \cdot \log_2(M_{eff}) \cdot \frac{E_{b \text{ avf}}}{2N_0}} \right), \quad (1.4)$$

де n_m – коефіцієнт, що дорівнює середній кількості сусідніх точок, котрі розміщені навколо однієї з точок сигнального сузір'я;

K_E – коефіцієнт, що дорівнює відношенню мінімально можливої енергії різниці двох символів, котрі відповідають сусіднім точкам сигнального сузір'я, до середньої енергії всіх символів, котрі відповідають неповторюваним точкам сигнального сузір'я;

$E_{b \text{ avf}}$ – середня енергія одного біта інформації;

N_0 – спектральна густина потужності білого шуму.

Установлено, що формула (1.4) придатна у разі застосування КФМн, КАМ та АМБС для обчислення ймовірності бітової помилки, що не перевищує 0,1. Математичне моделювання безпроводної мережі здійснене за допомогою персонального комп'ютера і розробленої програми в середовищі MathCAD [12].

Отримані залежності ймовірності бітової помилки P_b від відношення E_0 / N_{bavr} в підканалі безпроводної мережі передавання даних в умовах дії білого шуму із застосуванням досліджених різновидів модуляції сигналу наведені на рис. 4. Як видно з рис. 4, для досягнення ймовірності бітової помилки $= 1 \times 10^{-6}$ в безпроводній мережі за різних видів модуляції сигналу необхідно забезпечити, щоб відношення E_0 / N_{bavr} були такі: для КФМн – 10,5 дБ; для 8-АМБС зі зсувом – 12,3 дБ; для 8-КАМ – 13,4 дБ; для 16-АМБС зі зсувом – 13,9 дБ; для 16-КАМ – 14,4 дБ; для 32-АМБС зі зсувом – 16,0 дБ; і для 32-КАМ – 16,4 дБ. Отже, ймовірність бітової помилки для КФМн найменша порівняно з іншими наведеними модуляціями сигналу. За однакової кількості символів ймовірність бітової помилки у разі застосування досліджених різновидів М-АМБС менша порівняно з М-КАМ, зокрема для відношення $E_0 / N_{bavr} = 13,4$ дБ ймовірність бітової помилки в підканалі з використанням 8-АМБС зі зсувом менша у 27 раз порівняно з 8-КАМ.

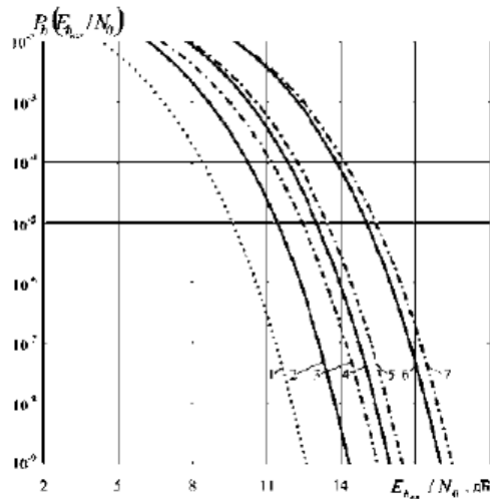


Рис. 1.4 Залежність імовірності бітової помилки P_b від відношення $E_{b_{avr}}/N_0$ в безпроводній мережі для різних видів модуляції сигналу: 1 – КФМн, 2 – 8-АМБС зі зсувом, 3 – 8-КАМ, 4 – 16-АМБС зі зсувом, 5 – 16-КАМ, 6 - 32-АМБС зі зсувом, 7 – 32-КАМ

Встановлено, що оцінка якості підканалів мережі з погляду забезпечення мінімальної ймовірності помилки за заданої швидкості передавання даних або максимальної швидкості передавання даних за заданої максимально допустимої імовірності помилки не є достатнім критерієм для порівняння декількох різних мереж. Універсальним критерієм оцінки підканалів мережі є інформаційна ефективність, що дає змогу порівняти їх за швидкістю передавання даних за заданих необхідної смуги пропускання ΔF_{sn} , відношення $E_{b_{avf}}/N_0$ і ймовірності помилки. Тому саме інформаційна ефективність вибрана для подальшого порівняння якості підканалів мережі із застосуванням розглянутих вище модуляцій сигналу. Інформаційна ефективність підканалу мережі визначається:

$$\eta = \gamma / \log_2 \left(\left(\frac{\gamma}{\beta} \right) + 1 \right), \quad (1.5)$$

де γ – частотна ефективність підканалу мережі, залежна від швидкості v_b передавання даних у підканалі та смуги пропускання підканалу ΔF_{sn} ;

β – енергетична ефективність підканалу мережі, залежна від відношення $E_{b_{avf}}/N_0$. Результати дослідження енергетичної, частотної та інформаційної ефективності підканалів безпроводних мереж, побудованих на основі технологій

LTE/LTE-Advanced, з використанням досліджених різновидів модуляції наведено на рис. 1.5.

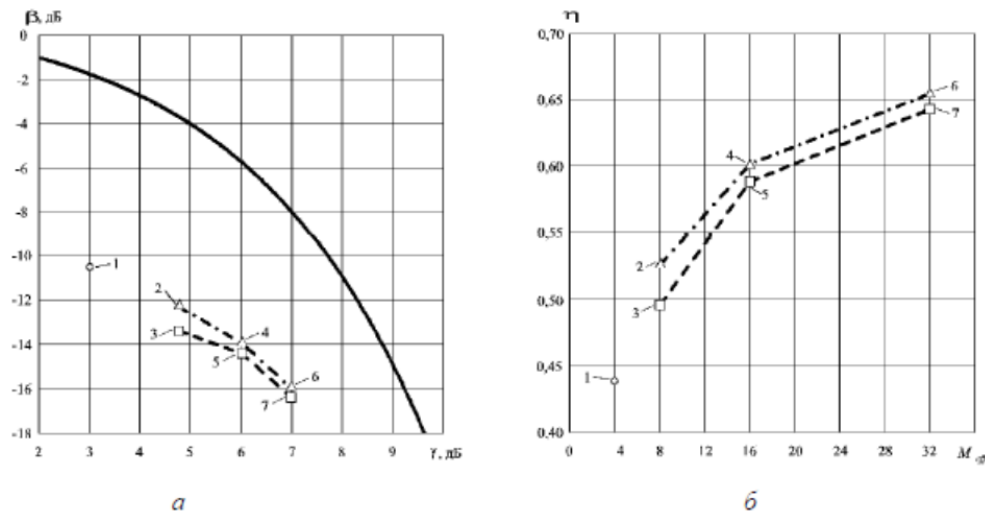


Рис. 1.5 Залежності частотної (а) та інформаційної (б) ефективності підканалів безпроводних мереж за використання дослідження різновидів модуляції сигналу: 1 – КФМн, 2 - 8-АМБС зі зсувом, 3 – 8-КАМ, 4 - 16-АМБС зі зсувом, 5 – 16-КАМ, 6 - 32-АМБС зі зсувом, 7 – 32-КАМ

За результатами досліджень встановлено, що ефективність підканалів безпроводних мереж, побудованих на основі технологій LTE / LTE-Advanced із використанням АМБС, вища порівняно із застосуванням інших розглянутих різновидів модуляції, зокрема інформаційна ефективність 8-АМБС зі зсувом більша на 20 % порівняно з КФМн і на 6,1% порівняно з 8-КАМ, інформаційна ефективність 16-АМБС зі зсувом більша на 37% порівняно із КФМн і на 2,3% порівняно з 16-КАМ, а інформаційна ефективність 32-АМБС зі зсувом більша на 49% порівняно з КФМн і на 1,8% порівняно з 32-КАМ, тому запропоновану АМБС доцільно використовувати в сучасних безпроводних мережах під час передавання даних для підвищення їх ефективності.

Специфікації будь-якого покоління зв'язку, як правило, відносяться до зміни фундаментального характеру обслуговування, технологій передачі, більш високим піковим бітрейтом, новими смугами частот, ширшим каналом смуги

пропускання, а також більшою місткістю для множини одночасної передачі даних (більш високій системі спектральної ефективності).

В LTE ширина смуги пропускання може варіюватися від 1,4 до 20 МГц, що дозволить задовольнити потребам різних операторів зв'язку, які володіють різними смугами пропускання. При цьому устаткування LTE повинно одночасно підтримувати не менше 200 активних з'єднань (тобто 200 телефонних дзвінків) на кожен 5-МГц соту. Також передбачається, що LTE поліпшує ефективність використання радіочастотного спектру, тобто збільшується обсяг даних, переданих в заданому діапазоні частот. LTE дозволяє досягти значних агрегатних швидкостей передачі даних – до 50 Мбіт/с для висхідного з'єднання (від абонента до базової станції) і до 100 Мбіт/с для низхідного з'єднання (від базової станції до абонента) (у смузі 20 МГц). При цьому повинна забезпечуватися підтримка з'єднань для абонентів, рухомих з швидкістю до 350 км/ч. Зона покриття однієї БС – до 30 км в штатному режимі, але можлива робота з сотою радіусом більше 100 км. Підтримуються багатоантенні системи MIMO.

Для технології LTE консорціум 3GPP запропонував нову мережеву інфраструктуру (SAE – System Architecture Evolution). Мета і зміст концепції SAE – ефективна підтримка широкого комерційного використання будь-яких послуг на базі IP і забезпечення безперервного обслуговування абонента при його переміщенні між мережами безпроводового доступу, які не обов'язково відповідають стандартам 3GPP (GSM, UMTS, WCDMA і так далі) [5-9]. У мережі з архітектурою SAE можуть застосовуватися вузли лише двох типів – базові станції (evolved NODEB, eNodeB) і шлюзи доступу (Access Gateway, AGW). Зменшення числа типів вузлів дозволяє операторам понизити витрати як на розгортання мереж LTE/SAE, так і на їх подальшу експлуатацію. Ядро мережі SAE включає чотири ключові компоненти:

- Модуль управління мобільністю (Mobility Management Entity, MME) забезпечує зберігання службової інформації про абонента і управління нею, авторизацію термінальних пристроїв в наземних мережах мобільного зв'язку і загальне управління мобільністю;

- Модуль управління абонентом (User Plane Entity, UPE) відповідає за встановлення низхідного з'єднання, шифрування даних, маршрутизацію і пересилку пакетів;
- 3GPP-якір грає роль шлюзу між мережами 2G/3G і LTE;
- SAE-якір використовується для підтримки неперервності сервісу при переміщенні абонента між мережами, як відповідними специфікаціям 3GPP, так й іншим (I-WLAN і тому подібне).

Важлива особливість SAE – призначені для користувача дані можуть пересилатися між базовими станціями безпосередньо, причому як за допомогою проводового, так і безпроводового зв'язку (інтерфейс X2). Це особливо важливо при хендовері, для швидкого безшовного перемикавання користувача між БС.

Технологія «WiMAX» було створено WiMAX Forum – організацією, яку засновано в червні 2001 року з метою просування і розвитку WiMAX. Форум описує WiMAX як «засновану на стандарті технологію, яка надає високошвидкісний бездротовий доступ до мережі, альтернативній виділені лініям і DSL». WiMAX у версії IEEE 802.16-2004 – стандарт бездротового зв'язку, який забезпечує широкосмуговий зв'язок на площі радіусом більше 30 км з пропускною здатністю, порівнянної з кабельними з'єднаннями – до 10 Мбіт/с і більше. Технологія WiMAX дозволяє працювати в будь-яких умовах, в тому числі, в умовах щільної міської забудови, забезпечуючи високу якість зв'язку та швидкість передачі даних. Робочі групи 3GPP RAN почали стандартизацію LTE/EPC в грудні 2004 з техніко-економічного обґрунтування для UTRAN і для IP EPC. У грудні 2007 всі функціональні специфікації LTE були закінчені. Крім того, EPC функціональні специфікації досягнень рівня, щоб взаємодіяти з 3GPP та мережами CDMA. Слід зазначити, що обидві технології досить близькі за спектральною ефективністю, тому якість параметрів систем також схожі. Але, враховуючи те, що WiMAX вийшов на ринок раніше, у розвитку і просуванні він теж виявився на сходінку вище LTE. А от архітектура у них дуже різна: в LTE вона має багато рівнів з використанням нестандартних протоколів, чого не

скажеш про WiMAX, де архітектура досить проста і використовується мало протоколів, до того ж всі вони стандартні (IETF).

Що стосується переходу від систем 3G до кожної з цих технологій, то все набагато складніше: потрібна значна заміна обладнання, що тягне за собою певні фінансові витрати для операторів. Перспективність технології LTE обумовлюється також тим фактом, що багато західних компаній висловили своє бажання впроваджувати її у своїх країнах «в ім'я світового злиття», але не вирішені технічних питання виникають навіть сьогодні.

З WiMAX, картина більш ясна, оскільки мережі побудовані на цій технології успішно працюють на території нашої країни значно довше і постійно вдосконалюються. До переваг цієї технології слід віднести:

- значно нижча вартість обладнання та послуг у порівнянні з попередніми технологіями;
- більша кількість послуг, які орієнтовані на абонента;
- висока гнучкість і простота розгортання мереж;
- легкість інтегрування в локальні мережі завдяки наявності IP;
- охоплення великої території, і важкодоступних ділянок;
- висока швидкість передачі інформації;

Не дивлячись на вже досить значний ряд переваг, технологія розвивається і далі.

Якщо говорити про нашу країну, то повноцінне 4G у нас з'явилося порівняно недавно. Основна мета розробників LTE Advanced – домогтися пропускної здатності до 1 Гбіт/сек. Судячи по всебічній підтримці LTE Advanced в галузі мобільного зв'язку, вже зараз зрозуміло, що вона стала ключовою технологією 4G.

Технології 4G – це одночасне об'єднання декількох ключових технологій і підходів, які включають в себе швидкий і доступний абсолютно в будь-якому місці Інтернет і потужні мобільні пристрої з можливістю підтримки cloud-based services (хмарні служби). У свою чергу, cloud-based services передбачає обробку інформації не в самому мобільному пристрої, а на шляху до нього, тобто в ефірі.

Це є вагомим пріоритетом при розробці мобільного терміналу, який за даних умов скорочує свою масу, і споживання енергії, що дає волю для фантазій дизайнерів, з метою задоволення найвибагливіших абонентів.

1.2 Аналіз стану мереж за технологією WiMAX

Слід відмітити більш просту архітектуру мереж WiMAX, високий рівень захисту у порівнянні з LTE. WiMAX та LTE використовують різні протоколи аутентифікації і захисту даних: в WiMAX - EAP-TLS (Extensible Authentication Protocol - Transport Layer Security) на основі заздалегідь наданого сертифікату, в LTE - ідентифікаційні карти USIM. Технологія Mobile WiMAX має перевагу у часі десь у 2–3 роки. Вперше мережі Mobile WiMAX були запущені в комерційну експлуатацію в Домініканській республіці (ONEMAX) і в Чилі (Telmex) у кінці 2007 року, в той час як запуск в експлуатацію першої у світі мережі на базі технології LTE відбувся у Швеції (TeliaSonera) у грудні 2009 року. На момент появи мереж за технологією LTE технологія WiMAX була вже зрілим рішенням для високошвидкісного широкосмугового доступу, її мережі були розгорнуті 477 операторами у 150 країнах світу. Хоча кількість мереж WiMAX значно перевищує усі мережі технології 4G, самі вони в основному невеликі. Найбільшими мережами Mobile WiMAX є: Sprint/Clearwire в США, UQ Communications в Японії; KT/СКТ в Південній Кореї і YTL Communications в Малайзії. Покриття, створене стільниковими мережами, починаючи з стандарту GSM, який з'явився у 90-х роках, незрівнянно більше у порівнянні з WiMAX. З появою технології LTE, яка не поступається WiMAX, багато великих операторів бездротового широкосмугового доступу почали планувати поступову міграцію на LTE в непарному частотному спектрі (TD-LTE — Time Division Long Term Evolution — різновид технології LTE з дуплексною передачею з розподілом каналів за часом), оскільки всі комерційні мережі WiMAX працюють у режимі TDD, незважаючи на те, що технологія WiMAX-Advanced підтримує обидва дуплексних режими (TDD, FDD/HFDD). Задача WiMAX-Forum полягає в тому, щоб забезпечити операторам

гнучкість у використанні своїх мереж для підтримки декількох технологій радіо доступу в одному і тому ж частотному діапазоні та звести до мінімуму інвестиції шляхом узгодження технологій і стандартів WiMAX та LTE у рамках IMT-Advanced. Фактично перехід на технологію WiMAX-Advanced та розробка її версій — WiMAX-Advanced Release 2.1 та WiMAX-Advanced Release 2.2 спрямовані на конвергенцію WiMAX з TD-LTE. WiMAX-Advanced Release 2.2 має підтримувати балансування навантаження між LTE TDD і WiMAX, балансування навантаження в межах базової станції або між піко- і макростільниками, забезпечувати агрегацію несучих (Link Aggregation).

WiMAX використовує унікальні переваги TDD наряду з агрегацією несучих, методом модуляції і кодування сигналу 256QAM, 8x8 MIMO, балансуванням навантаження з метою досягти мобільної швидкості в 1 Гбіт/с. Оператори на зрілих ринках, які мають доступ до додаткового спектру, вже почали розгортання мереж LTE TDD паралельно з існуючими мережами WiMAX. Зростає швидкими темпами і ринок пристроїв TDD LTE. Провідним постачальником WiMAX є японський оператор UQ Communications, який забезпечив 100 % покриття території країни. Компанія просуває свої послуги через власний UQ WiMAX, а також його оптових постачальників, розширює модельний ряд абонентських пристроїв, включаючи WiMAX-Advanced-смартфони, ноутбуки, збільшивши швидкість завантаження смуги пропускання WiMAX-Advanced (Release 2.1, Release 2.2) до 220 Мбіт/с (подвоєна швидкість). Підтримка WiMAX Advanced за цими версіями була введена для смартфонів ще в травні 2014 року. У травні 2015 року кількість контрактів компанії перевищила 10 млн. За даними на 2014 рік близько 25 комерційних мереж WiMAX-Advanced в основному працювали на частотах 2,3 ГГц, 2,6 ГГц, 3,5 ГГц. Різний розподіл TDD спектра в різних регіонах є проблемою для WiMAX-Advanced з точки зору глобалізації та роумінгу. В табл. 1.2 представлено стандартизований спектр TDD, придатний для розгортання WiMAX-Advanced, а в табл. 1.3 — основні країни та регіони, які використовують такі частоти. Говорячи про перспективи технології WiMAX, можна відмітити, по-перше, що WiMAX Advanced буде й далі

розвиватися, підтримуючи різні радіотехнології в рамках єдиної мережі, по-друге, WiMAX-форум буде розвивати технології WiMAX для інтелектуальних енергетичних мереж (Smart Grid), він розробив новий стандарт — WiGRID, який орієнтований виключно на завдання комунальних енергетичних мереж, по-третє, одне із значущих напрямків — стандарт AeroMACS (Aeronautical Mobile Airport Communications System) для побудови інтегрованих систем зв'язку аеропортів. Новий стандарт ґрунтується на стандарті IEEE 802.16, він має забезпечувати зв'язок в зоні аеропорту між літальними апаратами, спеціальним наземним транспортом, персоналом і різними фіксованими точками зв'язку. Для систем AeroMACS спеціально виділений діапазон 5,0–5,1 ГГц.

Таблиця 1.2

Номери діапазонів, діапазони частот, ширини смуг

Номер діапазону 3GPP TDD	Діапазон частот, МГц	Ширина смуги, МГц	Номер діапазону 3GPP TDD	Діапазон частот, МГц	Ширина смуги, МГц
33	1900–1920	20	39	1880–1920	40
34	2010–2025	15	40	2300–2400	100
35	1850–1910	60	41	2496–2690	194
36	1930–1990	60	42	3400–3600	200
37	1910–1930	20	43	3600–3800	200
38	2570–2620	50	44	703–803	100

Таблиця 1.3

TDD частотний спектр в країнах та регіонах

Частота, ГГц	Номер діапазону 3GPP TDD	Регіон
1,9/2,0	33, 34, 35, 36, 37, 39	Австрія, Китай, Європа, Японія, Росія, Південна Африка, Південна Азія
2,3	40	Африка, Канада, Китай, Індія, Латинська Америка, Росія, Південна Корея, Південна Азія, Близький Схід
2,6	41	Африка, Бразилія, Китай, Європа, Японія, Індія, Латинська Америка, Північна Америка, Саудівська Аравія
3,5/3,7	42, 43	Австралія, Європа, Латинська Америка, Північна Америка, Росія

Системи LTE - це революційне поліпшення 3G. LTE являє перехід від систем CDMA до систем OFDMA, а також перехід до повністю IP – системи з комунікацією пакетів. Тому впровадження цієї технології на існуючих мережах стільникового зв'язку означає необхідність нових радіочастотних ресурсів для отримання переваги від широкого каналу. Для забезпечення зворотної сумісності необхідні дворежимні абонентські пристрої. Тому плавний перехід від систем 3G до LTE є досить складним процесом.

Таблиця 1.4

Порівняння ключових параметрів LTE і WiMAX

Параметри	LTE	WiMAX Реліз 1.5
Дуплексування	FDD и TDD	FDD и TDD
Частотний діапазон для аналізу	2000 МГц	2500МГц
Ширина каналу	До 20 МГц	До 20 МГц
Від бази	OFDMA	OFDMA
До бази	SC-FDMA	OFDMA
Спектральна ефективність, біт/Гц/с		
Низхідний канал, MIMO (2x2)	1,57	1,59
Висхідний канал, SIMO (1x2)	0,64	0,99
Максимальна швидкість мобільної станції км/ч	350	120
Тривалість кадру, мс	1	5
Антені системи		
Низхідний канал	2x2, 2x4, 4x2, 4x4	2x2, 2x4, 4x2, 4x4
Висхідний канал	1x2, 1x4, 2x2, 2x4	1x2, 1x4, 2x2, 2x4

Відзначимо, що перевага в спектральній ефективності означає вигреш у вартості розгортання мережі (в тому числі в питомій вартості по відношенню до

пропускної здатності мережі). Крім того, зростає канална ємність, що дозволяє операторам вводити додаткові сервіси. Мобільний WiMAX являє гладку IP-мережу, мережа LTE, у свою чергу, складніша рис. 1.6.

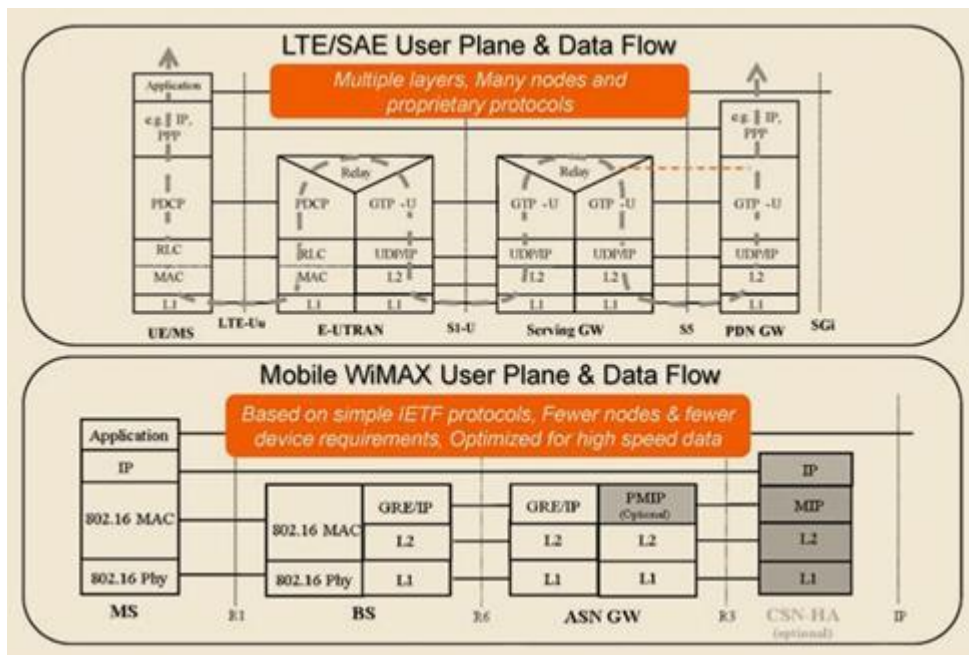


Рис. 1.6 Порівняння системних архітектур мереж WiMAX і LTE

Якщо мережа WiMAX ґрунтується повністю на IP-протоколах IEEE, то мережа LTE складніша, включає в себе більшу кількість протоколів, в тому числі пропрієтарні протоколи 3G. Важливо, що інтелектуальна власність в області технологій WiMAX, відповідні патенти розподілені серед багатьох компаній, не дивлячись на те, що існує (створений) відкритий патентний альянс, який дозволяє знижувати ціни абонентських пристроїв.

1.3. Аналіз стану мереж за технологією LTE

Що стосується технології LTE, за даними GSA (Глобальної асоціації постачальників мобільного обладнання) станом лише на початок 2020 року у 143 країнах світу розгорнуто більше 400 мереж (темпи поширення мереж представлені на рис. 1.7). В більше ніж 45-ти країнах світу 88-ми операторами введені в експлуатацію мережі LTE-Advanced.

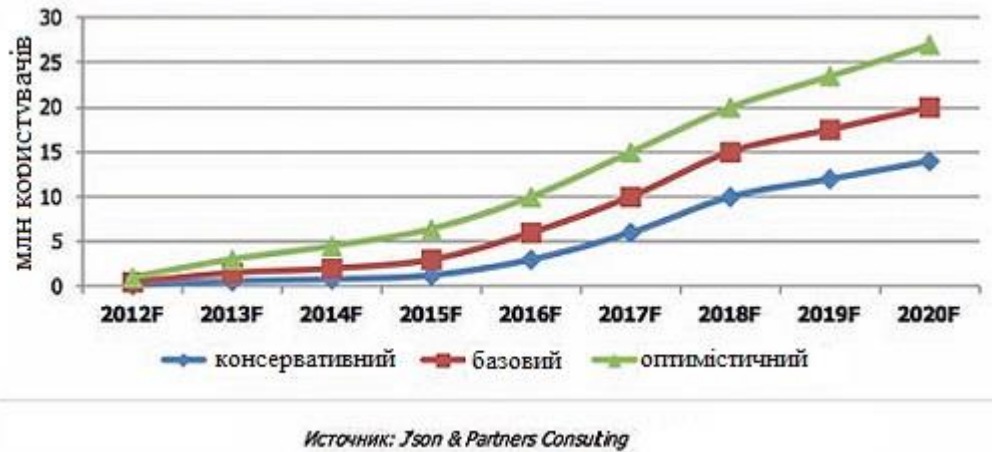


Рис. 1.7 Темпи розгортання мереж за технологією LTE в світі

Швидкість передачі даних залежить не тільки від типу мережі, а й від категорії абонентських пристроїв. В 37 мережах LTE-Advanced для абонентів з смартфонами Category 6 доступні швидкості до 300 Мбіт/с. В серпні 2015 року австралійська телекомунікаційна компанія Telstra успішно протестувала дві нових моделі абонентських пристроїв Category 9 смартфони Samsung Galaxy S6 Edge Plus та Galaxy Note 5 в мережі LTE-Advanced, отримавши швидкість завантаження в 450 Мбіт/с. Telstra застосувала агрегацію трьох смуг частот: 700 МГц, 1800 МГц і 2600 МГц, а вже через місяць запустила перший у світі пристрій Category 11 з піковими швидкостями до 600 Мбіт/с.

Розглянемо детальніше розширені можливості мереж LTE-Advanced у порівнянні з попередніми стандартами:

1. Збільшення пікової швидкості передачі даних: до 3 Гбіт/с у низхідному каналі (DL) та до 1,5 Гбіт/с у висхідному (UL).
2. Більш висока спектральна ефективність (Release 10 — до 30 біт/с на 1 Гц, Release 8 — до 16 біт/с на 1 Гц).
3. Збільшення числа одночасно активних абонентів.
4. Розширення смуг частот й агрегація спектру (Carrier Aggregation). Агрегація несучих смуг дозволяє передавати дані на кількох несучих частотах LTE з кожного терміналу і на кожен термінал. При цьому розширюється загальна смуга частот і підвищується швидкість передачі даних кінцевим користувачам

(рис. 8, *a*). Агрегація несучих може бути використана як для FDD, так і TDD. Несучі смуги можуть мати пропускну здатність 1, 3, 4, 5, 10, 15 або 20 МГц, причому можуть бути об'єднані не більше п'яти несучих смуг. Таким чином, максимальна пропускну здатність становить 100 МГц. Кількість агрегованих несучих може бути різною в DL і UL, проте кількість несучих UL не може бути більше, ніж кількість несучих DL. Крім агрегації сусідніх несучих частот в межах одного діапазону, технологія LTE-Advanced також підтримує можливість агрегації смуг з різних діапазонів частот (рис. 1.8, *б*), як це реалізовано в мережі Telstra. Подібна позасмугова агрегація частот або агрегація спектра, дозволяє операторам з фрагментованими спектрами отримувати більш широкі смуги частот.



Рис. 1.8 Агрегація спектру: *a* — агрегація несучих частот (сумарна ширина смуги до 100 МГц); *б* — агрегація смуг на рознесених частотах

5. Однією з основних змін в LTE-Advanced є введення 8 x 8 MIMO в DL та 4 x 4 MIMO в UL.

6. Розширена підтримка гетерогенних мереж (HetNet). До макростільників додаються пікостільники, що дозволяє передавати більший об'єм трафіка та збільшувати швидкість передачі даних.

7. У Release 10 введені три нові категорії абонентських пристроїв Category 6, Category 7, Category 8.

8. Конвергенція радіодоступу для парного і непарного спектрів, що підвищує ефективність його використання, є однією з основних переваг всіх версій LTE.

9. Функція ретрансляції, яка дозволяє мобільним терміналам обмінюватися даними з мережею через вузол ретрансляції, з'єднаний по бездротовому зв'язку з

донорним вузлом eNodeB (рис. 1.9) з використанням технології радіодоступу LTE.

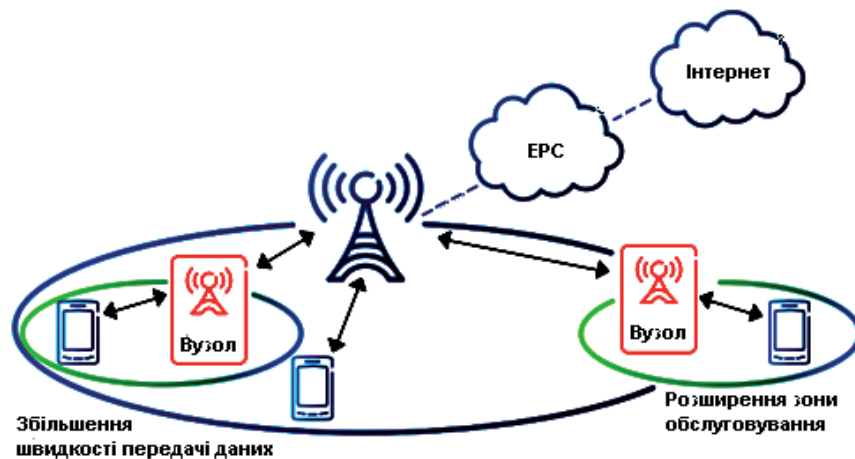


Рис. 1.9 Функція ретрансляції

З точки зору терміналу вузол ретрансляції представляється «звичайною» базовою станцією. Це означає, що застарілі абонентські пристрої також можуть підключатися до мережі через вузол ретрансляції. Функція ретрансляції дає можливість як розширити зони обслуговування, так і збільшити швидкості передачі даних.

2. ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ КЛАСИФІКАТОРІВ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

2.1. Самоорганізація моделей складних об'єктів

Однією з основних особливостей самоорганізуючих систем є здатність протистояти тенденціям випадкових змін параметрів каналів зв'язку, здатність адаптуватися до умов, що змінюються, перетворюючи при необхідності свою структуру. Проаналізуємо два підходи до самоорганізації: «кібернетичний» підхід, при якому система організується під дією управляючого органу; синергетичний – система сама, за допомогою сукупності деяких управляючих параметрів "запускає" процес самоорганізації, система сама без управляючого органу вибирає шлях свого розвитку до більш високої організації.

Прогнозування та моделювання все більш широко застосовується у світовій практиці управління та прийняття рішень майже у всіх сферах діяльності. У процесі вирішення проблем прогнозування та моделювання розроблено велику кількість засобів, процедур, методів, методик, методологій та способів. На їх основі створено безліч прогнозуючих та моделюючих систем.

Сучасні інфокомунікаційні мережі характеризуються різноманітністю обладнання, різноманітним типом структури. Окремі компоненти розосереджені територіально. На даний час однією з актуальних задач є створення адекватних моделей, які дозволяють оцінити параметри окремих об'єктів інфокомунікаційної мережі та визначити властивості, характерні для функціонування мережі в цілому. Особливий інтерес для розрахунку параметрів мережі і прогнозування зміни параметрів представляють самоорганізуючі моделі складних об'єктів.

Одним із методів для рішення комплексу задач, пов'язаних з СУ інфокомунікаційної мережі є відомий Метод Групового Урахування Аргументів запропонований А.І. Івахненко, який реалізує вибір кращої (селекцію) на основі змінних багаторядної моделі оптимальної складності [59]. В роботі запропоновано

застосування ітераційного МГУА, на основі якого одержуємо оптимальні альтернативні моделі, що дозволяють здійснити вибір найкращих за показниками.

Принципова відмінність від звичайного регресивного аналізу полягає в тому, що метою першого є одержання мінімуму вибраного критерію вибору визначеної множини, а метою другого – досягнення мінімуму середньоквадратичної помилки (СКП) на всіх експериментальних точках при наперед заданому виді рівняння регресії, що часто носить суб'єктивний характер. Тому за МГУА пропонується розбивати дані на дві частини: перевірочну і навчальну послідовності. Навчальну послідовність використовують для оптимізації коефіцієнтів рівняння регресії, як і при звичайному регресійному аналізі, а перевірочну послідовність – для оцінки ступеня регулярності за величиною відносного значення СКП. (Регресія – ймовірнісна залежність середнього значення деякої величини від іншої величини).

Модель складного об'єкту визначається як математичний опис (у вигляді рівняння або системи рівнянь), відповідний по теоретичному представленню експертів принципу його дії, або адекватному об'єкту. У простих випадках представлення експертів не розходяться, тому поняття моделі визначається таким чином. Наприклад, величину відхилення параметра контрольованого об'єкту (КО) від норми доцільно описати відомим диференціальним рівнянням другого порядку, де вхідні параметри - це команди управління, а вихідні - це вихідні величини відхилення параметрів від норми (параметри КО – це затримка передавальної інформації, ймовірність похибки, кількість управляючої інформації та ін.). У складних випадках в об'єкті можна вказати декілька закономірностей, що визначаються аналогічно, за законами фізики. Систему таких закономірностей, якщо вона досить повна, також можна назвати фізичною моделлю складного об'єкту.

В інфокомунікації, зазвичай, розглядаються об'єкти моделювання. Фізична модель стійкого об'єкту також стала, тобто її функціональність має затухаючий характер. Тому самоорганізація фізичної моделі у вигляді системи

диференціальних або різницевих рівнянь може мати своєю метою або ідентифікацію структури і параметрів об'єкту, або короткостроковий прогноз на 1-3 кроки дискретизації часу вперед. Для довгострокового прогнозу на 10 або більше кроків фізична модель непридатна, оскільки через недосконалість моделі помилка прогнозу з кожним кроком зростає.

Фізична модель (для ідентифікації об'єкту або короткострокового прогнозу) може бути отримана за допомогою самоорганізації лише при визначеному обсягу апіорної інформації про об'єкт. Визначення фізичної моделі при дуже малій апіорній інформації прийнято називати «відкриттям закономірностей». Тому потрібні дослідимо алгоритми самоорганізації, зокрема, питання про самоорганізацію фізичної моделі за допомогою звичайних алгоритмів МГУА [6].

Для самоорганізації фізичної моделі не існує такого критерію, котрий би оптимізував параметри, які забезпечують всі показники якості. Тому параметри системи, що впливають на якість, вибираються за допомогою методу експертних оцінок. Критерії МГУА і критерій мінімуму середнього квадрату відхилення відображають лише ті або інші сторони фізичної моделі (наприклад, її несуперечність на різних вибірках даних). Вони дають можливість знайти фізичну модель лише в тому випадку, якщо:

- серед моделей, що підлягають аналізу по критеріях, міститься модель, яка по складу змінних, класу рівняння і вигляду опорної функції відповідає фізичній моделі;

- у ансамблі критеріїв перебору моделей-претендентів бере участь критерій, що відображає деяку властивість (ознаку) фізичної моделі, наприклад, її несуперечність (критерій мінімуму зміщення);

- серед змінних вихідних даних, немає величин, що тісно корелюються з величинами, які беруть участь в законі (орієнтовно коефіцієнт взаємної кореляції $K < 0,9$);

- знайдено геометричне місце мінімумів критерію $n_{зс}^2$.

До визначення фізичної моделі експертами. На останні дві необхідні умови можна не звертати уваги, якщо в кінці алгоритму самоорганізації передбачений етап довизначення фізичної моделі експертами. У моделях, отриманих за допомогою самоорганізації, кожен вибраний чинник є представником множини інших чинників, які корелюються з ним, тобто ті, що змінюються в часі так само. При виконанні інших умов (окрім умови відсутності колінеарних змінних) дійсна модель завжди знаходитиметься серед кращих по критерію моделей, і експерт легко виявить її серед невеликого числа моделей на виході алгоритму самоорганізації. Із збільшенням потужності завод (неточності даних) і при неповному інформаційному базисі (тобто за відсутності даних про який-небудь істотний чинник, що входить у фізичну модель) самоорганізація може запропонувати експертам ряд найменш суперечливих моделей. При довизначенні моделі експерти вказують фізичну модель за деяким критерієм більш високого рівня. В якості такого пропонується критерій екзогенності (викликаний зовнішніми причинами) змінних, що вибирає модель за ознакою наявності в ній причинно-наслідкового зв'язку, а також критерій балансу прогнозів.

Прогнозуючі моделі, які отримуємо за допомогою самоорганізації, можна представити диференціальними рівняннями звичайних або часткових похідних, або їх кінцево-різницевиими аналогами. Клас рівнянь і вигляд опорних функцій у моделях вибирається відповідно до особливостей модельованого об'єкту. Наприклад, для оцінки параметрів каналу зв'язку таких як амплітудно-частотна і фазочастотна характеристики, широке застосування знаходять тригонометричні функції. Гармонійні алгоритми самоорганізуючих моделей часто виявляються найкращими серед інших алгоритмів для довгострокового прогнозу. У всіх вказаних випадках слід розрізняти моделі для короткострокового прогнозу (і ідентифікації об'єкту) та моделі для довгострокового прогнозу [88].

Відмінність моделей легко виявляється вже при перших аналізах самоорганізації моделей оптимальної складності. Виявляється, що для моделей короткострокового прогнозу вибираються:

- фізичні моделі, де (в разі відсутності процедури довизначення) деякі із змінних можуть бути замінені подібними з ними змінними;
- чинники, що швидко змінюються;
- повний інформаційний базис (вся множина чинників фізичної моделі);
- змінні з одним інтервалом усереднення (наприклад, лише середні значення).

Для моделей довгострокового прогнозу вибираються:

- нефізичні моделі, які визначаються як рівняння, що відрізняються від рівнянь математичної фізики і містять лише частину чинників;
- чинники, що викликані плинними діями;
- скорочений інформаційний базис (незначне число чинників);
- змінні з двома-трьома інтервалами усереднення змінних (наприклад, для вибору інтервалу усереднення при синхронізації багатопозиційного сигналу OFDM).

2.2. Обґрунтування доцільності застосування нефізичних моделей за допомогою аналогії з каналом зв'язку

Самоорганізація нефізичних прогнозуючих моделей. Відповідно з постановкою завдання прогнозування змінної, що підлягає прогнозу, можна розглядати як вихідну величину деякої динамічної управляючої системи, схильної до дії випадкових завад. В результаті самоорганізації виходить математична модель динамічної системи, що дозволяє перетворити вхідний вектор $u(t)$ у вихідний вектор $y(t)$. Залежно від апіорної інформації про досліджувану систему можуть бути отримані моделі статичних систем, динамічних систем із зосередженими і розподіленими параметрами.

Основні положення теорії самоорганізації нефізичних прогнозуючих моделей пов'язані з основними положеннями загальної теорії зв'язку. Згідно

теорема Шеннона для каналів зв'язку за наявності завад: при збільшенні завад слід зменшувати смугу пропускання приймача, так і в моделюванні для досягнення найбільшої точності необхідно спрощувати структуру моделі [12-14]. Фізична модель є оптимальною лише за відсутності завад і при повному інформаційному базисі.

Відповідно до теорії інформації, коли підвищення завадостійкості приводить до зменшення пропускнуої спроможності, підвищення рівня шумів приводить до зменшення пропускнуої спроможності, зменшення числа рівнянь і спрощення структури прогнозуючої моделі, отримуваної в результаті самоорганізації. Алгоритми самоорганізації при певному виборі їх структури і виду критеріїв володіють високою завадостійкістю: завади можуть у декілька разів перевищувати корисний сигнал, лише трохи міняючи результат. Пояснюється це тим, що розміри області моделювання (тобто число рівнянь моделі) та складність моделі (кількість складових в кожному рівнянні) при самоорганізації і вибираються в процесі перебору варіантів: за допомогою спеціальних програм вибираємо фізичну модель лише в тому випадку, якщо вона дійсно призводить до досягнення мінімуму ансамблю або ієрархії заданих критеріїв [14]. Тобто для довгострокового прогнозу потрібні саме нефізичні моделі. Нефізичні моделі з неповним інформаційним базисом або із зайвими (по фізичних характеристикам процесу) змінними дають достатню точність.

2.3. Методика одержання вихідних даних за допомогою об'єднання декількох об'єктів у однорідні класи

Характерним для багатьох досліджень, особливо в системах управління, є відсутність необхідного для самоорганізації обсягу вихідної інформації. Проте, є можливість отримати інформацію про процеси по іншим об'єктам, подібним досліджуваному. В цьому випадку створюються однорідні групи досліджуваних об'єктів, для яких необхідно побудувати адекватні моделі. Існують різні прийоми визначення однорідних класів об'єктів. Наприклад, прийнято, що два об'єкти

належать до одного і того ж класу, якщо обидва вони можуть бути описані подібними моделями [7, 14]. При цьому передбачається, що структура вихідної інформації для об'єктів, що відносяться до одного класу, однакова, тобто для кожного i -го об'єкту є m реалізацій (y_t^i, u_t^i) , де u_t^i - вектор. Для об'єктів i та j отримані моделі

$$y_t^i = f_i(u_t^i); y_t^j = f_j(u_t^j). \quad (2.1)$$

В якості міри відповідності обрані

$$E_{ij} = \sum_{t=1}^m (y_t^i - f_j(u_t^i))^2 / m + \sum_{t=1}^m (y_t^j - f_i(u_t^j))^2 / m, \quad (2.2)$$

тобто середня сума відхилень однієї з моделей, обчислена за вихідною інформацією іншої моделі. Цей критерій можна вважати, як різновид критерію мінімуму зсуву, причому реалізації одного об'єкту утворюють навчальну послідовність A , а реалізації іншого – перевірочну B .

Для n об'єктів бажане розділення на класи досягається за допомогою наступних один за одним об'єднань об'єктів і груп. Для цього необхідно обчислити E_{ij} для всіх можливих комбінацій пар об'єктів. Потім для кожного i -го об'єкту знаходиться елемент, що належить йому, з найменшим розузгодженням. Якщо справедлива нерівність $\min E_{ij} \leq E_0$, де E_0 – деяка задана величина, то тоді обидва елементи належать до одного класу, інакше – ні. Ця процедура багато разів повторюється, поки для заданого E_0 не утворюються класи однорідних об'єктів.

При обчисленні E_{ij} передбачається, що для кожного об'єкту є m реалізацій, що досить для знаходження моделей $y = f_j(u_t^i)$, $j=1, 2, \dots, n$. Для малих m такий підхід неможливий. В цьому випадку можна побудувати загальну модель $y_M = f_M(u)$, яка відповідає деякому усередненому об'єкту. Якщо передбачається, що у виразі для t функції досить «рівні», то тоді

$$\Delta_i = \sum_{t=1}^m (y_{it} - f_M(u_{it})), i=1, 2, \dots, n \quad t=1, 2, \dots, m, \quad (2.3)$$

представить середні відхилення окремих об'єктів і від усередненої моделі. Якщо, наприклад, y – значення продуктивності, то $\Delta_i < 0$ означає, що даний об'єкт лежить нижче середнього рівня продуктивності. Відповідно можна ці об'єкти розділити на три класи: 1) $\Delta_i \leq -B$; 2) $|\Delta_i| < B$; 3) $\Delta_i > B$. Дійсно, досліджуючи систему управління інфокомунікаційними мережами, доцільно виділити, наприклад, 98КО та 37 параметрів. Отримані моделі використовуються в автоматизованій системі планування.

Одна з основних пропозицій полягає в тому, аби дані по кожному КО застосовувати повністю як навчальну послідовність [4]. Для утворення перевірконої послідовності використовуються дані по іншому КО, найбільш близькому за своїми характеристиками до першого. Звідси виникає завдання виділення пар КО, схожих за своїми характеристиками. (У теорії розпізнавання образів подібне завдання прийнято називати кластеризацією вхідних зображень).

За допомогою алгоритму кластеризації всі 98КО розбито на однорідні групи. Завдання формування однорідних груп КО полягає в послідовному об'єднанні спочатку за якісними, а потім за кількісними ознаками. Основною якісною ознакою є функція, що виконуються КО. Наприклад, модем, система комутації, система передачі інформації та інше.

Всередині однорідних груп сформовано дрібніші однорідні групи (по два КО по близькості сукупності впливу чинників на зміну якісних показників). Це дозволило зменшити усереднення результатів моделювання і підвищити таким чином його точність. Кожному КО в просторі чинників відповідає точка (місце). Критерієм схожості може бути відстань між точками КО, які порівнюються між собою.

Якщо продовжити дослідження, то можна для кожного класу об'єктів знайти відповідну математичну модель і аналогічним чином отримати подальше ділення об'єктів на підкласи.

Модель складного об'єкту визначається як його математичний опис (у вигляді рівняння або системи рівнянь), відповідний по теоретичних представленнях експертів механізму його дії, або адекватне об'єкту.

У простих випадках представлення експертів не розходяться, тому поняття моделі визначається таким чином. Наприклад, величину відхилення параметра контрольованого об'єкту (КО) від норми доцільно описати відомим диференціальним рівнянням другого порядку, де вхідні параметри – це команди управління, а вихідні - це вихідні величини відхилення параметрів від норми (параметри КО – це затримка передавальної інформації, ймовірність похибки, кількість управляючої інформації та ін.)

У складних випадках в об'єкті можна вказати декілька закономірностей, що визначаються аналогічно, за законами математичної фізики. Систему таких закономірностей, якщо вона досить повна, також можна назвати *фізичною моделлю складного об'єкту*.

2.4. Визначення оптимального числа чинників

Серед об'єктів, що підлягають моделюванню, зустрічаються такі, в яких прогноз деякої вихідної змінної може бути достатньо точно визначений лише за інформацією про зміну цієї змінної на деякому інтервалі часу спостереження. Такою властивістю володіє прогноз зміни рівня [5]. Пояснюється це тим, що в таких об'єктах діє багато внутрішніх кореляційних зв'язків (наприклад, зв'язків між параметрами контрольованих об'єктів). Мінімальне число вихідних змінних (або число мір свободи) моделі визначається нерівністю $m \geq (M-f)$, де M – загальне число характеристичних змінних об'єкту; f – число зв'язків. У таких об'єктах $m = 1$, тобто M більше f всього на одиницю, що і дозволяє отримувати прогнози будь-якої із змінних лише по відомостям без врахування даних про зміну інших величин.

При прогнозуванні величини затримки $m = 2$ (для деяких вихідних змінних $m = 3$) [5, 6]. Зв'язки f при самоорганізації залишаються нам невідомими, тому величину m визначають з прогнозування за алгоритмами МГУА. Обирається стільки змінних і такі з них, які дають мінімум критерію кількості управляючої інформації.

У моделях прогнозу величини ймовірності $P_{оп}$ середньої похибки ОК, економетрики та інших завданнях слідує, перш за все, скоротити число рівнянь та чинників і залишити лише найсуперечливіші рівняння (тобто рівноточні на різних вибірках даних) та самі інформативні чинники і тим самим перейти до прогнозу меншого числа добре прогнозованих основних (характеристичних) вихідних змінних по малому числу чинників. Всі інші змінні, що цікавлять нас, прогнозуються у функції основних показників та часу (по однорядних алгоритмах МГУА).

3. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ LTE

3.1 Вибір обладнання абонентських станцій

З точки зору функціоналу обладнання систем зв'язку стандарту WiMAX поділяється на базове та абонентське.

Слід відзначити, що перше покоління чіпів (System on a Chip (SoC)) мало не високу продуктивність. Як і належить першим прототипам базове обладнання мало низький рівень інтеграції, що в свою чергу відобразилось на підвищенні продуктивності смартфонів та інших мобільних терміналів. Інакше кажучи, в певний момент склалася ситуація, коли користувачі, з технічної точки зору, були готові до впровадження нових технологій та послуг, а оператори – ні, адже для побудови мережі за новими стандартами та технологічними рішеннями не достатньо замінити обладнання попередніх поколінь на нове, більш інноваційне. З технічної точки зору це відобразилося в першу чергу на MAC-протоколі, адже саме для його реалізації на базовій станції необхідні більш високі обчислювальні потужності. З цією метою було необхідним вдаватися до використання зовнішніх обчислювальних потужностей (процесорів) для виконання верхнього рівня MAC-протоколу. В комплексі чіпсети системи передачі даних стандарту WiMAX реалізують функції фізичного рівня і функції нижнього рівня MAC-протоколу. Слід відзначити, що з кожним роком мережі вдосконалювалися, тому частина функцій, яка раніше виконувалася лише за допомогою зовнішніх обчислювальних технічних рішень, тепер виконується завдяки одній SoC

Опис і технічні характеристики обладнання WiMAX

На кінець 2010 року WiMAX-форум зареєстрував понад 100 моделей сертифікованого обладнання від майже 40 різних виробників та постачальників. Проте, цей список, в більшості, налічує обладнання стаціонарних систем передачі даних (системи фіксованого доступу).

В наші дні широке застосування знаходить обладнання мобільного зв'язку, і це зовсім не дивно, тому що починаючи з, приблизно, 2015 року принципи роботи з мережею Інтернет, обмін мультимедійними файлами, передача голосу, робота з електронними системами тощо суттєво змінилися. Розмір мультимедійного контенту став більш великим та вимогливішим для обладнання користувачів, а, відповідно, і до телекомунікаційної мережі. Тому виробники обладнання (абонентського і базового) змушені розробляти нові та вдосконалювати наявні системи для забезпечення високими швидкостями, стабільною та надійною роботою мереж передачі даних.

Одним з найбільш відомих та вагомих виробників мобільного WiMAX обладнання є компанії Alvarion, Alcatel-lucent (серія 97xx), Cisco System, Huawei, Motorola, Samsung, ZTE та ін. Їх обладнання та технічні рішення сертифіковані WiMAX-форумом, а отже вони можуть надавати користувачу широкий спектр телекомунікаційних послуг без загрози втрати якісних показників.

В якості прикладу розглянемо побудову базового і абонентського обладнання мобільного WiMAX на прикладі BREEZEMAX 4motion. Дане устаткування вироблено ізраїльською компанією Alvarion та активно використовується для побудови систем передачі інформації 4-го покоління. Система 4motion – це комплекс повнофункціональних технічних рішень мобільного WiMAX високого класу якості. Архітектура системи відкрита, тому є можливість сполучати обладнання різних виробників в одній мережі. Платформа BREEZEMAX 4motion включає чотири основні складові:

- абонентські станції;
- базові станції;
- шлюзи мережі доступу (ASN-шлюзи);
- сервери системи управління авторизацією, аутентифікацією і доступом (AAA-сервери).

AAA-сервери є типовими та стандартними мережевими серверами, згс необхідні для повсякденної роботи мережі та контролю якості наданих телекомунікаційних послуг. Зазвичай виробники, які не мають свої AAA-серверів,

використовують устаткування компаній Bridgewater і Cisco. Їх робота реалізується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, тому складність роботи з параметрами мережі залежить виключно від вміння працювати з програмою та комп'ютерами. Також, програмним шляхом забезпечується проходження даних користувача між пристроями мережі (смартфонами, вузлами IP-мереж, базовими станціями і т.д.).

Для інженерів та проектувальників абонентського обладнання стандарту WiMAX найбільш цікавими та перспективними є технічні рішення за технологією SoC. Як правило основні виробники таких систем є компанії Fujitsu, Intel, Sequans і Wavesat. До речі, саме компанією Intel вперше було запропоновано розробникам SoC PRO/Wireless 5116 для абонентських станцій WiMAX. В даному рішенні було інтегровано функції як фізичного, так і MAC рівнів. Інший приклад - чіп MB87M3400 від компанії Fujitsu. Його особливістю є підтримка більш широкого діапазону додатків, що дозволяє розробляти як базове, так і абонентське обладнання. Компанією Sequans були розроблені окремі SoC - SQN1010 і SQN2010. Перший слугує для базового обладнання, а другий - для абонентського. Тобто, для виконання одних і тих самих функцій як у Intel та Fujitsu в даному випадку виконують дві окремі системи. Також цікаві технічні рішення є і у компанії Wavesat, що випустили окремі мікросхеми: OFDM-модем DM256 і MC336 (представляє собою обчислювальне ядро). В цілому, у кожній компанії є свої технічні рішення та погляди на створення системи передачі даних, проте чи буде саме це рішення вдалим, залежить від багатьох факторів. Однією з особливостей вищерозглянутих SoC є незалежність від зовнішнього процесора, що позитивно відзначається для побудови автономних систем зв'язку. Щодо характеристик розглянутих SoC, то вони сильно відрізняються один від одного, проте основні з них є незмінні: тип дуплекса, ширина каналу, енергоефективність, гнучкість та інші. Також, однією з важливих характеристик є параметри радіоінтерфейсу SoC. В даних прикладах він містить блоки АЦП та ЦАП для прямого аналогового з'єднання із зовнішнім приймачем. Більш детальна

інформація щодо порівняння основних параметрів рішень для розробки абонентського обладнання WiMAX представлено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Основні параметри рішень для розробки абонентського обладнання WiMAX

Параметр	Fujitsu MB87	Intel PRO/Wireless 5116	Sequans SQN1010	Wavesat DM256/MC336
Функції	PHY/MAC	PHY/MAC	PHY/MAC	PHY/MAC
Максимальна ширина каналу	20 МГц	10 МГц	28 МГц	10 МГц
Режим дуплекса	H-FDD, TDD, FDD (2 чіпа)	H-FDD, TDD	H-FDD, TDD, FDD	H-FDD, TDD, FDD
Системний Інтерфейс	Mill, 32-bit generic	MI	RMLL, PCI	PCI

3.2. Вибір обладнання базових станцій

Візьмемо до аналізу розробку БС технології WiMAX на основі SoC відомих виробників.

SoC MB87M3400, який було розроблено компанією Fujitsu використовується для побудови як базового обладнання так і абонентського (термінали зв'язку користувачів). Проте, на відміну від технічної реалізації компанії Intel, чіп Fujitsu має інтерфейс для роботи з зовнішніми обчислювальними системами, інакше кажучи має можливість підключення додаткового обладнання. Для розробки БС Fujitsu надає комплекс технічних рішень для реалізації повнодуплексного режиму роботи системи. В цей комплекс входить процесор Freescale MPC8560 та спеціалізоване програмне забезпечення для більш ефективного управління терміналами. На практиці програмне забезпечення не завжди входить в комплект, тому такі питання слід обговорювати з постачальником завчасно.

Компанією PicoChip розроблено рішення PC102/PC8520. Це SoC, побудований на двох власних процесорах PC102 працюючих паралельно один одному. Разом з технічною складовою PicoChip надає програмне забезпечення для

реалізації фізичного рівня і функцій нижнього рівня MAC-протоколу. Обчислювальна потужність, як і у випадку з Fujitsu - Freescale MPC8565, слугує для реалізації верхнього рівня MAC-протоколу (програмне забезпечення ліцензоване). Для виконання процедур шифрування і дешифрування даних необхідне використання сторонніх обчислювальних рішень, що є недоліком для побудови мережі.

SoC SQN2010 компанії Sequans для розробки БС є першою «системою на кристалі», яка має повнодуплексний режим роботи. Даний SoC реалізує всі функції фізичного і MAC рівнів.

SQN2010 відрізняється від SQN1010 наявністю другого центрального процесора, що реалізує верхній рівень MAC-протоколу. Проте на чіпі SQN1010 передбачений інтерфейс PCI для забезпечення можливості підключення зовнішнього процесора, тому в даному випадку необхідно відштовхуватися від потреб мережі: для більшої продуктивності використовувати SoC SQN1010, а для стаціонарних довгострокових рішень - SQN2010.

SoC DM256/MC336 виробника Wavesat може бути використано і для розробки БС. DM256/MC336 підтримує повнодуплексний режим роботи, але так само як і з попередніми системами функцій шифрування і дешифрування необхідно підключення зовнішньої обчислювальної потужності. Програмне забезпечення не надається, тому дане питання також слід уточнювати у постачальника, або шукати додаткові рішення у сторонніх розробників.

З усіх вищеописаних технічних рішень лише «системи на кристалі» PicoChip PC102 не інтегрують в собі функцій АЦП/ЦАП. Тому для розробок, в яких використовується аналоговий радіоінтерфейс, додатково будуть потрібні пристрої АЦП та ЦАП. Основні параметри розглянутих рішень для розробки базових станцій представлені в табл. 3.2.

Вибір SoC для побудови систем зв'язку 4-го покоління - важливе стратегічне рішення. Для ефективною розробки мережі необхідно максимальна підтримка програмним забезпеченням та апаратними рішеннями плюс засоби контролю та налагодження.

Наявність налагоджувальних комплектів дозволяє значно збільшити швидкість і зменшити вартість розробки обладнання четвертого покоління, що є одним з головних критеріїв при виборі того чи іншого технологічного рішення.

Таблиця 3.2

Основні параметри розглянутих рішень для розробки базових станцій WiMAX

Параметр	Fujitsu MB87	PicoChip PC102/PC8520	Sequans SQN2010	Wavesat DM256/MC336
Функції	PHY/MAC	PHY/MAC	PHY/MAC	PHY/MAC
Максимальна ширина каналу	20 МГц	10 МГц	28 МГц	10 МГц
Кількість чіпів TDD FDD	1 чіп 1 чіп	2 чіпа 2 чіпа	1 чіп 1 чіп	1 чіп 1 чіп
Системний інтерфейс	Mill, 32-bit generic	МП	RMLL, PCI	PCI
Радіоінтерфейс	Аналоговий і цифровий	Цифровий	Аналоговий і цифровий	Аналоговий і цифровий

Процес планування мережі LTE

Основними відмінностями технології LTE від попередніх технологій мобільного зв'язку 2G і 3G є:

- організація зв'язку, як голосовий обмін, так і передачі даних по IP-протоколу;
- високі швидкості передачі даних;
- спрощена архітектура мережі.

Обладнання транспортної мережі слід вибирати, в першу чергу керуючись особливостями технології LTE, а отже, щоб дане обладнання відповідало вимогам надійності, відрізнялося ефективністю, гнучкістю, компактністю, володіло широким набором функцій і задовольняло поняттю «ціна - якість». Головною умовою при виборі обладнання транспортної мережі є надійна передача даних користувачів згідно розрахованої пропускної здатності мережі LTE.

Транспортна мережа проектованої системи буде реалізована за допомогою оптоволоконних ліній передач за технологією Ethernet (IEEE 802.3). Технологією Ethernet визначено такі швидкості:

- Ethernet - 10 Мбіт/с;
- Fast Ethernet - 100 Мбіт/с;
- Gigabit Ethernet - 1 Гбіт/с;
- 10 Gigabit Ethernet - 10 Гбіт/с.

Швидкості в 1 і 10 Гбіт/с підходять для транспортної мережі. Істотною перевагою систем Ethernet є широка масштабованість і максимальна наближеність до стека протоколів IP.

У світі проектування мобільних мереж існують різні рішення вибору обладнання як мережі радіодоступу, так і транспортної мережі. Компанії - виробники обладнання для мереж мобільного зв'язку надають операторам пакети готових рішень, що складаються з підбраного за різними показниками стека апаратури. У пакети готових рішень для реалізації транспортної мережі мобільного оператора можуть входити робочі станції, комутатори, маршрутизатори, мультисервісні станції, а також спеціалізоване обладнання для управління мережею.

На сьогоднішній день серед всіх рішень різних компаній-виробників комутаційного обладнання для реалізації транспортної мережі LTE виділяються вирішення двох компаній: «Cisco Systems» і «Alcatel - Lucent».

Зробимо короткий аналіз рішень цих компаній і зведемо дані в таблицю 3.3.

З таблиці видно, що рішення компанії «Cisco Systems» для реалізації транспортної мережі LTE є кращим за багатьма параметрами, і, хоча ціна на обладнання даного виробника більше, проте висока якість виконання та високий рівень технічної підтримки дозволяють зробити вибір саме на користь даної продукції. Компанія «Cisco Systems» на сьогоднішній день є безумовним лідером виробництва комутаційного обладнання в світі. Продукцію даної компанії використовують в своїх мережах понад 250 операторів мобільного зв'язку більш ніж у 75 країнах світу. Продукція, що випускається компанією «Cisco Systems» володіє такими якостями як надійність, продуктивність, багатофункціональність, масштабованість і безпеку. Тому, в даній роботі перевага віддається саме їй.

Таблиця 3.3

Дані аналізу рішень для реалізації транспортної мережі LTE компаній «Cisco System» і «Alcatel - Lucent»

Комутаційне обладнання транспортної мережі LTE		
	«Cisco Systems»	«Alcatel - Lucent»
Комутаційне обладнання мережі радіодоступу E-UTRAN	Комутатор «ME 3600 CX24C»: універсальний, з можливістю підключення до трьох eNB; 24 1 GEthernet порту; висока ціна; протоколи передачі - OSPF, RIPv2, EIGRP, BGP; час напрацювання на відмову 7 років; протокол управління - SNMP; IP маршрутизація	Сервісний маршрутизатор «7750 SR»: підходить для великомасштабних мереж в мегаполісах; IP маршрутизація; 10 портів 10 GEthernet; висока ціна; для підключення OB використовуються додаткові модулі SPF; протоколи передачі - OSPF, BGP
Комутаційне обладнання мережі інтелектуальної агрегації	Оптичний сервісний маршрутизатор «7603 OSR»: продуктивність 240 Гбіт / с; 48 портів GBASE-LX; 4 порту 10GBASE-ER; висока ціна; масштабованість; протоколи передачі - OSPF, RIPv2, EIGRP, BGP; час напрацювання на відмову 7 років; протокол управління - SNMP; IP маршрутизація	Маршрутизатор сервісної агрегації «7705 SAR»: 6 портів 10/100 Ethernet BASE-T; 2 порти GE BASE-TX з модулями SPF; низька ціна, низька продуктивність; IP маршрутизація; протоколи передачі - OSPF, BGP
Устаткування для реалізації EPC LTE, управління послугами	Мультисервісна оптична платформа «ASR 5000»: продуктивність 320 Гбіт / с; інтерфейси - GE, 10GE; висока ціна; масштабованість; протоколи передачі - OSPF, RIPv2, EIGRP, BGP; час напрацювання на відмову 7 років; протокол управління - SNMP; IP маршрутизація	Система управління мережею «5620 SAM»: включає в себе кілька комутаторів і маршрутизаторів; підтримка Ethernet, ATM; IP маршрутизація; протоколи передачі - OSPF, BGP

Обладнання транспортної мережі для передачі даних за технологією LTE поділяється на:

- Транспортне обладнання мережі радіодоступу;
- Транспортне обладнання інтелектуальної агрегації.

У компанії «Cisco Systems» є готові рішення побудови транспортної мережі для мобільних операторів. Скористаємося одним з них.

В якості транспортного обладнання мережі радіодоступу виберемо комутатор «Cisco ME 3600 X 24CX». Дана модель реалізована з урахуванням

величезного досвіду роботи компанії «Cisco Systems» з операторами мобільного зв'язку; дана модель володіє апаратним прискоренням, необмеженою продуктивністю, низькими затримками і джитером. Чіпсет комутатору «Cisco ME 3600 X 24CX» розроблений спеціально для мереж Carrier Ethernet.

Коротка технічна характеристика комутатори «Cisco ME 3600 X 24CX»:

Кількість оптоволоконних портів: 6;

Організація IP-маршрутизації;

Підтримувані швидкості: 10/100/1000 Мбіт/с;

Протокол управління: SNMP;

Протоколи передачі даних: OSPF, IS-IS, EIGRP, RIPv2;

Оперативна пам'ять: 1024 МБ;

Пропускна здатність: 65 Mpps;

Максимальна швидкість передачі даних: 44 Гбіт/с;

Fiber ethernet cabling technology: 1000 Base-LX, 100 Base-BX, 100 Base-FX, 100 Base-LX;

Fiber optic connector: LC, LX-5;

Дистанція передачі по оптико-волоконному кабелю: 80 км;

Довжина хвилі: 1310/1550 нм.

Комутатор «Cisco ME 3600 X 24CX» не виключає можливості підключення до нього декількох базових станцій eNB. В якості транспортного устаткування інтелектуальної агрегації виберемо оптичний сервісний маршрутизатор «Cisco 7603 OSR» (Optical Service Router). Оптичний маршрутизатор «Cisco 7603 OSR» призначений для побудови територіально розподілених (WAN) та міських (MAN) мереж. Основним завданням даного маршрутизатора є забезпечення роботи критичних IP додатків на швидкості оптичних каналів зв'язку.

Основні можливості і технічні характеристики маршрутизатора «Cisco 7603 OSR»:

- підтримка повного спектру функцій ПЗ Cisco IOS;
- шасі, сумісне зі стандартом NEBS;

- висока доступність платформи завдяки резервуванню блоків живлення, керуючих модулів і програмних можливостей ПЗ Cisco IOS - Global ResilienceIP;
- апаратне прискорення мережевих послуг завдяки технології Cisco PXF;
- підтримка технології MPLS/IP;
- 24 порти 10 Base-FL, 24 порти 10Base-FX, 48 портів 1000 Base-LX, 4 порти 10 GBase-ER;
- максимальна продуктивність: 240 Гбіт/с, 30 млн. пакетів/с;
- пропускна здатність шини: 32 Гб / с;
- середній час напрацювання на відмову: 7 років;

Згідно зробленому вибору транспортного обладнання на наступному етапі дипломного проектування складемо схему організації зв'язку транспортної мережі.

3.3 Розрахунок споживаної потужності

Щоб знайти потужність по змінному струму (РАС), потрібно потужність по постійному струму (PDC) розділити на коефіцієнт корисної дії (ККД) випрямних пристроїв (0,8 - 0,9). Вихідні дані для розрахунку споживаної потужності наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Вихідні дані для розрахунку потужності

Обладнання	Кількість (штук)	Потужність, що споживається (Вт)	РАС/PDC
Радіомодуль «Flexi Multiradio»	3	790	РАС
Комутатор «Cisco ME 3600 X 24CX»	1	228	PDC

Потужність по змінному струму визначається за формулою:

$$РАС = PDC / 0,8 \quad (3.1)$$

$$P_{ком} = 228 / 0.8 = 285 \text{ (Вт)}$$

Для того, щоб знайти сумарну потужність $P_{сум}$ споживану обладнанням, скористаємося такою формулою:

$$P_{сум} = P_{рм} + P_{ком} \quad (3,2)$$

$$P_{сум} = 790 + 285 = 1075 \text{ (Вт)}$$

Значення струму навантаження I_n розраховується за формулою:

$$I_n = P_{сум} / U_{ном}, \quad (3.3)$$

де $U_{ном}$ - значення живлячої напруги, $U_{ном} = 220 \text{ В}$.

$$I_n = 1075 / 220 = 4.8 \text{ (А)}$$

При плануванні мережі LTE доцільно дотримуватися загальноприйнятої часової і логічної послідовності дій:

1. Отримання вихідних даних;
2. Калібрування математичної моделі розповсюдження радіохвиль на основі вимірів напруженості поля в найбільш характерних точках зони покриття мережі;
3. Побудова мережі початкового наближення;
4. Прив'язання ділянок розгортання базових станцій, визначених планом побудови (мережі початкового наближення) до місцевості;
5. Ітеративна оптимізація мережі при широкому використанні засобів програмного забезпечення, що підтримують функції синтезу мережі та аналізу експлуатаційних характеристик.

Першим кроком є побудова першого наближення. Завдання побудови початкового наближення мережі LTE можна сформулювати таким чином: при заданій смузі частот потрібно визначити просторові параметри мережі (кількість базових станцій та розміри їх зон обслуговування) за умови, що пікові швидкості передачі даних по лінії «униз» і лінії «угору» максимальні, а кількість базових станцій у складі мережі не перевищує допустимого значення. Іншим варіантом може бути рішення задачі мінімізації кількості базових станцій у складі мережі за заданих значень пікових швидкостей передачі даних по лінії «униз» і лінії

«угору». Складність завдань побудови початкового наближення мережі LTE не дозволяє знайти пряме рішення.

При побудові початкового наближення стільникової мережі з ортогональним частотним поділом каналів будемо вважати, що:

- Щільність абонентів на території обслуговування мережі постійна, а розподіл абонентів по території рівномірний;
- Розміри всіх стільників мережі одні й ті ж;
- Морфоструктура місцевості однотипна (відкрита місцевість, приміський район або міська забудова).

Для підвищення точності побудови початкового наближення мережі всю територію обслуговування необхідно умовно розбити на фрагменти, де сформульовані вище допущення можна вважати прийнятними.

Таким чином, на етапі побудови початкового наближення вся мережа декомпозується на однорідні фрагменти, стосовно до яких перебуває розподіл базових станцій по зонах обслуговування, параметри базової мережі і розподіл частотного ресурсу. Виходячи зі сформульованих вище обмежень, мережа має регулярну однорідну структуру, тобто вузли eNB видалені між собою на однакову відстань, технічні характеристики і кількість прийомопередавачів, а також висоти підвісу антен, азимуту і кути нахилу однакові для всіх eNB.

Для побудови мережі початкового наближення потрібно досить великий набір вихідних даних, достовірність яких може суттєво вплинути на адекватність прийнятого рішення. На цьому етапі проводиться оцінка бюджету втрат — показника, що характеризує допустимі втрати в радіолінії для заданого стандарту стільникового мобільного зв'язку. Таким чином, послідовність кроків планування опорного сегменту мережі LTE має такий вигляд.

Побудова первинного наближення радіосегменту

1. Визначення просторових параметрів мережі;
2. Оцінка параметрів базових станцій;
3. Оцінка пропускної здатності при заданому профілі трафіку;
4. Частотное планування.

Побудова опорного сегменту мережі LTE

Опорний сегмент мережі LTE доцільно будувати за такою послідовністю дій:

1. Розрахувати пропускну здатність каналів радіомережі;
2. Розрахувати початкове наближення пропускнуї спроможності мережі LTE для кожного eNB;
3. Обрання обладнання. Обираючи обладнання транспортної мережі, потрібно керуватися особливостями технології LTE. Це значить, що обладнання повинно задовольняти критерію «ціна – якість», відповідало вимогам надійності, було достатньо ефективним, гнучким, компактним, багатофункціональним;
4. Надійність. Стабільна та постійна передача даних користувачів згідно з розрахованою пропускную здатністю мережі LTE.

Реалізувати транспортну мережу проектованої мережі LTE можна використовуючи оптоволоконні лінії передачі за технологією Ethernet. У технології Ethernet (стандарт IEEE 802.3) [7] визначено необхідні швидкості. Швидкості в 1 і 10 Гбіт/с задовольняють проектовану транспортну мережу. До найбільших систем Ethernet можна віднести широку масштабованість і максимальну наближеність до стека протоколів IP.

Вартість обладнання

Задля організації обміну даними систем зв'язку технології LTE потрібно обрати два типи транспортного обладнання (ТО):

1. ТО мережі радіодоступу.
2. ТО інтелектуальної агрегації.

ВИСНОВКИ

Одним з актуальних питань сьогодення є питання впровадження нових технологій в інформаційні системи нашої країни. Сучасний розвиток інформаційних та телекомунікаційних технологій дозволяє не лише покращувати життя людини, але і розвивають економіку держави шляхом створення мобільних додатків, програмного забезпечення або розробки та проектування мереж зв'язку. Проте, розвиваючі нові технології необхідно усвідомлювати в площині яких телекомунікаційних мереж вони будуть працювати, а враховуючи те, що наша країна майже повністю перейшла на роботу в мережах 4-го покоління (принаймні великі міста), відповідь є однозначною. Ключовою технологією для задоволення всіх потреб користувачів було взято технологію LTE як сучасну, ефективну і широко застосовувану у світі мережу.

Для коректної роботи сучасних систем передачі даних нагальним питанням є організація мережі LTE. Саме тому в проведеній роботі було розглянуто актуальні питання, які дають можливість зробити аналіз перед розгортанням або модернізацією мережі обміну даними.

У першому розділі роботи було проведено порівняльний аналіз ключових технологій четвертого покоління WiMAX та LTE. Розглянуто характеристики технологій, їх відмінності, архітектуру і перспективність. Саме ці питання є найважливішими перед початком процесу проектування нової мережі передачі даних

Другий розділ роботи присвячено питанню архітектури мережі LTE, де більш детально розглянуто структуру мережі LTE, функціональні відмінності від систем 3-го покоління та основні вимоги до базового та абонентського обладнання.

Третій розділ присвячено вибору обладнання для побудови мережі LTE. Було розглянуто обладнання абонентських станцій, обладнання базових станцій та визначені основні критерії для проведення розрахунку споживаної потужності. В результаті було проаналізовано комплекси систем відомих виробників (Intel, ZTE, Samsung) та визначено відмінності, які кожна з них пропонує для побудови

мережі. Розглянуто технологію SoC кожного виробника та проаналізовано на яких чіпах можливо досягти найбільшої продуктивності мережі при її проектуванні або модернізації.

Варто відмітити, що 4-те покоління систем зв'язку це довгий час буде використовуватися на ринку телекомунікацій як нашої країни так і багатьох інших країн світу. Основні причини – зручність використання технологій, високі показники обміну даними та наявність готових рішень для розгортання нової мережі.