

# ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

УДК 621.3

М.М. Климаш, О.А. Лаврів, В.І. Венгерак, Р.С. Цуркан  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра телекомунікації

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МЕРЕЖІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ LTE-UMTS

© Климаш М.М., Лаврів О.А., Венгерак В.І., Цуркан Р.С., 2010

**Запропоновано концепцію розгортання мережі четвертого покоління на основі існуючої мережі UMTS. Розроблено архітектуру базової станції eNodeB. Введено поліпшені схеми модуляції та кодування з метою підвищення енергетичних характеристик та швидкості передавання. Удосконалено параметри системи завдяки використанню системи антенних решіток MU-MIMO.**

**The article offers the concept of fourth generation network deployment on the basis of the existing network of UMTS. A base station architecture eNodeB has been elaborated. Improved modulation and coding schemes have been introduced to improve energy performance and transmission speed. Parameters of the system have been improved by using MU-MIMO antenna.**

**Вступ.** У сучасних умовах ринку інфокомунікаційних послуг відбувається стрімкий розвиток комп'ютерної техніки, телекомунікаційного обладнання, Інтернету, до того ж помітне зростання інтеграції цих складових. Користувачі мережі зацікавлені в усе більш швидкісному і, разом з тим, недорогому доступі. Розвиток засобів передавання даних може дати змогу забезпечити мобільним телефонам нові можливості, а також зробити нарешті телефон повноцінним засобом доступу до Інтернету. Для задоволення запитів користувачів і виник інноваційний проект 4G.

Важлива передусім потенційна швидкість передавання даних. Номінальне значення її становить 100 Мбіт/с – набагато більше ніж значення для попередника – мережі 3G. Однак виникає питання: навіщо потрібні такі швидкості, і чи буде у них необхідність? Відповідь однозначна: буде! І справа тут не в голосовому зв'язку – він цілком здатний працювати і при стандартних для 2G 9,6 Кбіт /с. Масове використання сервісів на зразок MMS, пересилання великих файлів і нормальне (в сенсі інтенсивності) застосування ресурсів Інтернету – все це відкриває привабливі перспективи перед майбутніми користувачами цього дива техніки. Уможливорюється передавання відео високої якості і проведення повноцінних відеоконференцій. Обмін повідомленнями практично нічим не буде обмежений – тільки розумними межами обсягу.

Головною цінністю, яку може отримати абонент мережі 4G, – це повна “цифрова свобода”. Тобто користувач завжди матиме під рукою високошвидкісний канал для передачі даних. Завдяки географічній свободі і високим швидкостям, якіснішими і витонченішими стануть всі послуги, що є сьогодні на ринку. Оператори орієнтуватимуть своїх абонентів, передусім, на послуги, пов'язані зі споживанням “важкого контенту” – повноцінний інтернет-браузинг, передавання даних (файли, електронна пошта, доступ у корпоративні бази даних тощо). Безумовно, продовжать розвиватись сервіси, пов'язані зі споживанням аудіо і відео. Отож, тепер абсолютно нового вигляду набуває концепція придбання цифрового контенту та його використання.

Мета роботи – побудова мультисервісної мережі доступу з використанням технології LTE на основі наявної мережі UMTS (рис. 1).

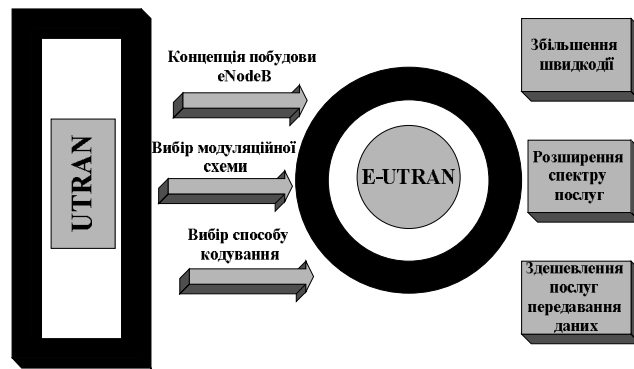


Рис. 1. Технологія реконструкції радіоінтерфейсу системи UMTS для досягнення вимог стандарту LTE

**Концепція мультисервісної мережі доступу за технологією LTE.** Стандартна мережа UMTS [2, с. 427–448] нині зазнає еволюційних змін, архітектура мережі пакетного передавання даних визначена як доповнення до наявних мереж – тобто необхідне збільшення витрати на розгортання та експлуатацію.

У Evolved UMTS мережах всі комунікаційні потоки розглядаються як пакети даних, що дають змогу організувати конвергентні мережі та спростити архітектуру [1, 23-43].

Отож, еволюція UMTS полягає у такому:

- Розвиток опорної мережі, як наслідок – глобальний перехід до пакетного передавання даних додатків.
- Мережа доступу – існуючий доступ UMTS мережі, також UTRAN (Універсальна наземна мережа радіодоступу) розвивається в напрямку E-UTRAN (Evolved-UTRAN), що відрізняється високою швидкістю передавання даних з низьким рівнем затримки пакетів і оптимізованою технологією радіодоступу.

Однією з головних цілей LTE на основі UMTS є висока продуктивність радіоінтерфейсу. E-UTRAN називається доступом до мережі Evolved UMTS, у який входить не тільки радіоінтерфейс, а й також сукупність вузлів та інтерфейсів підтримки наземних радіофункцій.

Зважаючи на те, що LTE забезпечує гнучку мобільність, а розроблена базова станція eNodeB здатна обробляти сигнали інших технологій, пропонується варіант мультисервісного доступу, наведений на рис. 2.

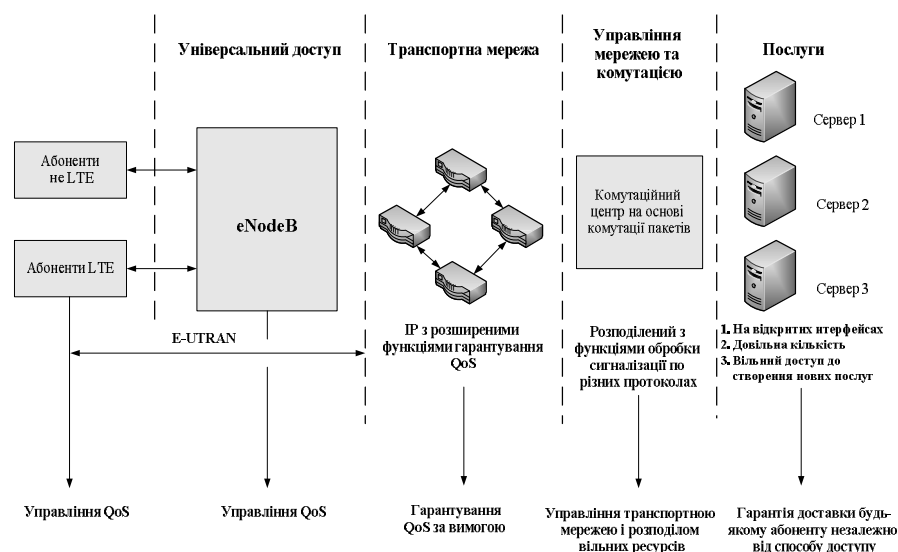


Рис. 2. Запропонована архітектура мультисервісної мережі LTE з універсальним доступом на основі eNodeB

Вузол eNodeB забезпечує під'єднання різних класів абонентів до єдиної мультисервісної мережі на основі IP технології. Він частково виконує функції управління якістю обслуговування абонентів та маршрутизації трафіку. Транспортна мережа, основана на IP-технології, повинна забезпечувати перенесення інформації з гарантованим QoS. Комутаційний центр будується на основі комутації пакетів, поверх якої може емулюватися комутація віртуальних каналів. Доступ до послуг відкритий, введення нових послуг забезпечується відкритістю інтерфейсів. Будь-яка послуга повинна бути доставлена будь-якому абоненту незалежно від способу доступу до мережі. Доступ обмежує лише параметри якості обслуговування.

**Архітектура eNodeB.** Зазначимо, що, на відміну від мережі радіодоступу UMTS, LTE RAN має тільки один тип вузла – eNodeB. У роботі запропоновано архітектуру еволюційної базової станції, що успадкувала більшість функціональності блока контролю радіомережі (RNC). Основними додатковими модулями є:

- § блок множинного доступу і динамічного розподілу ресурсів;
- § блок обробки;
- § блок адміністративного радіоконтролю;
- § блок внутрішньокімрового управління радіоресурсами.

Порівняно із класичною базовою станцією UMTS eNodeB має додаткові особливості, а саме:

- контроль радіоресурсів (Radio Resource Control), що полягає у розміщенні, модифікації і використанні ресурсів для передавання через радіоінтерфейс між призначеним для користувача терміналом і eNodeB;
- управління радіомобільністю (Radio Mobility Management), що забезпечує здійснення вимірювання в радіоканалі і передавання рішення про перерозподіл ресурсів;
- радіоінтерфейс – протокол рівня 2. Як відомо, в моделі OSI рівень 2 гарантує прозору та безпомилкове передавання даних між мережевими об'єктами.

Використання цієї удосконаленої базової станції дає змогу працювати із трафіком від інших технологій, забезпечуючи належну якість зв'язку. Заміна звичайних базових станцій дасть операторам змогу пришвидшити перехід до мереж четвертого покоління.

**Моделювання та дослідження ефективного кодування як одного з ключових етапів забезпечення вимог технології LTE.** LTE як еволюція WCDMA вимагає високої пропускної здатності – щонайменше 100 Мбіт/с. Оскільки турбокодер і декодер в UMTS мережах призначені для швидкостей <10Мбіт/с, їх не можна використати для більших швидкостей передачі. Нижче подано етапи забезпечення вимог технології четвертого покоління.

§ вибір кодера і перемежувача.

Як кодер для LTE вибрано турбокодер [1, с. 221–225], подібний до того, що використовувався в UMTS. Основним обмеженням пропускної здатності в кодері і декодері є перемежувач (interleaver), який для цієї технології у роботі пропонується замінити. В турбокодах роль перемежувача полягає в тому, що він зменшує кореляційну залежність між сусідніми бітами кодового слова, що дає змогу на кожній ітерації декодування зменшувати ймовірність помилки. У проекті вибір зупинено на перемежувачі з квадратичним поліномом перестановки (QPP перемежувач) (рис. 3), оскільки він має повністю алгебраїчну будову, ставить менші вимоги до пам'яті, має реалізований паралелізм, тому його доцільніше використовувати за високих швидкостей передачі.

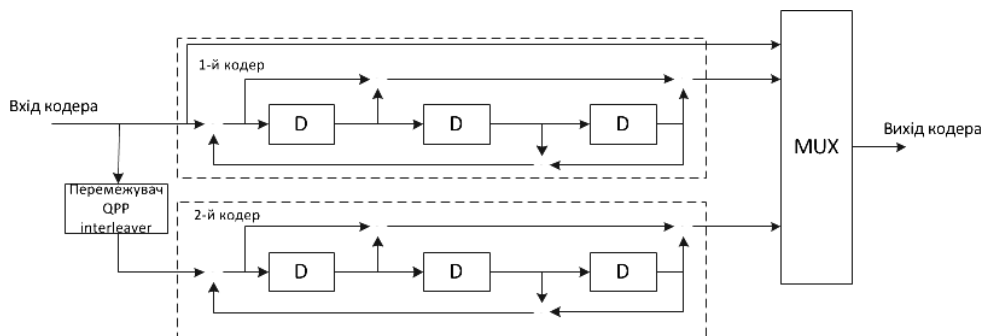


Рис. 3. Структурна схема типового турбокодера для LTE

## § Вибір декодера

Під час побудови декодера одним з найважливіших факторів є ймовірність бітових помилок (BER) при певному відношенні сигнал/шум. Саме на базі цього параметра та оцінювались різні декодери, серед яких можна виділити два основні: декодер Вітербі, який раніше використовувався в UMTS, і декодер на основі алгоритму максимуму апостеріорної ймовірності (MAP). З метою порівняння розроблена модель системи передавання інформації в середовищі Matlab (рис.4). На основі порівняння ймовірності бітових помилок MAP-декодер є на порядок кращим за декодер Вітербі, тому у роботі пропонується застосовувати його як декодер для LTE.

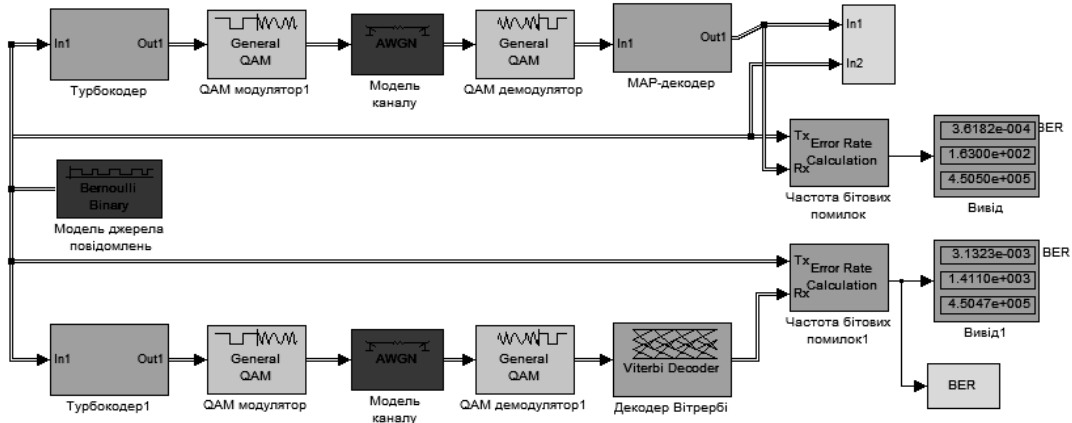


Рис.4. Модель для порівняння ефективності декодера Вітербі і MAP-декодера

**Дослідження модуляції OFDM/OQAM у каналі “вниз”.** Модуляція OFDM/OQAM, на відміну від традиційної модуляції OFDM, не вимагає наявності захисних інтервалів (циклічних префіксів) [1, с. 114–130]. Квадратурно-амплітудна маніпуляція із зсувом OffsetQAM (OQAM) значно підвищує ефективність використання частотного спектра за рахунок зменшення інтерференційних міжсимвольних перешкод та ущільнення сигналу за часом (рис. 5).

Під час формування сигналу OFDM/OQAM символи QAM ( $C_{mn}$ ) поділяються на дві комплексні складові: дійсну частину і уявну, причому уявна частина зсувається в часі на величину  $T_u/2$  щодо дійсної (рис. 5).

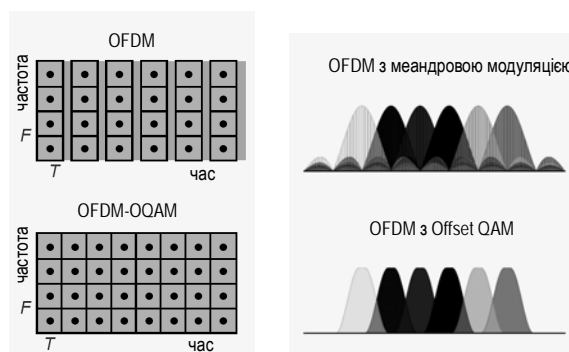


Рис. 5. Перевага технології OFDM / OQAM відносно OFDM / QAM

Важливою відмінністю OFDM/OQAM і класичної OFDM є те, що швидкість передавання сигнальних символів подвоюється ( $\tau_0 = T_u/2$ ). Схема формування сигналу OFDM / OQAM у передавачі базової станції мережі E-UTRAN показана нижче на рис. 6 [3, с. 67–76].

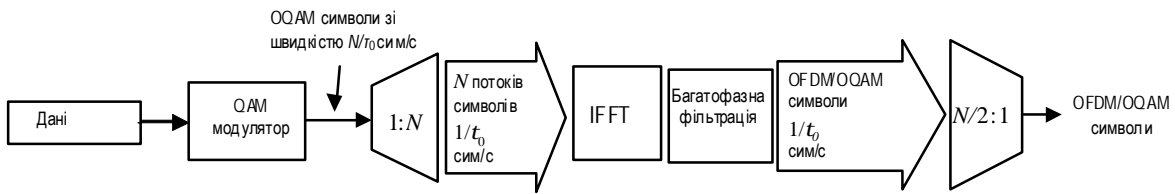


Рис. 6. Схема формування сигналу OFDM / OQAM у передавачі базової станції

Також важливою перевагою OFDM/OQAM над OFDM є використання багатофазної фільтрації (фільтрувальна функція ЮТА –  $g$ ) після перетворення IFFT, що виключає використання циклічних префіксів. Алгоритм функціонування передавача і приймача сигналів OFDM/OQAM наведено на рис. 7.

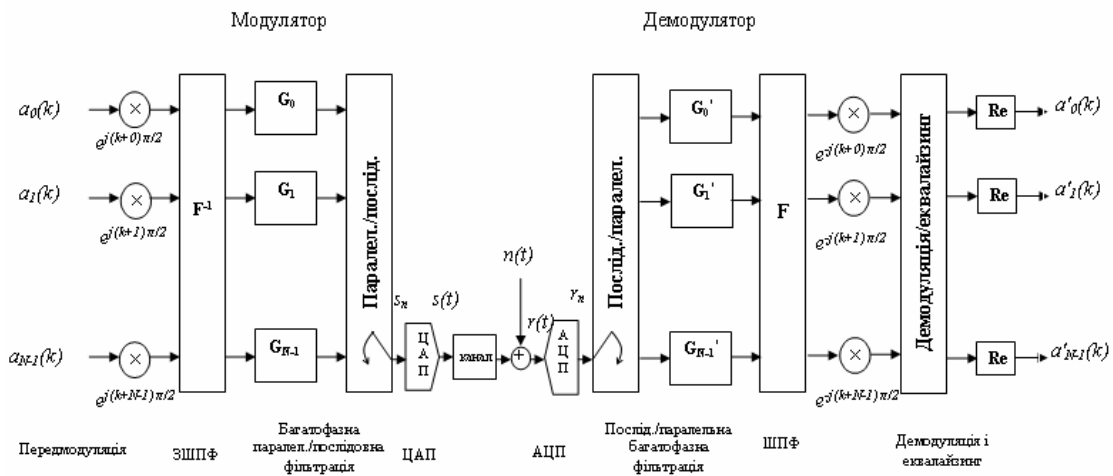


Рис. 7. Алгоритм функціонування передавача і приймача сигналів OFDM / OQAM

Одним зі спрощених варіантів багатофазної фільтрації (функції ЮТА), що забезпечує ортогональність сигналів, є гауссівська функція в часовій і частотній областях. Завдяки функції ЮТА відбувається локалізація спектра, в результаті чого зменшуються інтерференційні і внутрішньосистемні перешкоди в мережі.

У табл. 1 наведено дані для вибору виду модуляції. Основними параметрами, які розглядаються для прийняття рішення, є спектральна ефективність, втрати у швидкості, втрати у відношенні сигнал/шум та ймовірність бітових помилок. Розглянуто три способи розділення вхідного потоку по ортогональних каналах, а саме: OFDM без захисного інтервалу, OFDM із захисним інтервалом, та запропонований в роботі варіант OFDM/OQAM. Модуляція OFDM із захисним інтервалом відзначається високими значеннями втрат, низькою спектральною ефективністю, тому вибір роблять між OFDM без захисного інтервалу та OFDM/OQAM. Запропонований у роботі інноваційний метод модуляції за рахунок високих енергетичних показників та відсутності міжсимвольної інтерференції та інтерференції між несучими рекомендовано до впровадження у технології LTE.

Аналізуючи вищезазначені одержані результати, запропоновано методику визначення сумарної ефективності модуляційної схеми за формулою (1).

$$c = h \cdot (1 - SNR_{loss}) \cdot (1 - BW_{loss}) \cdot \frac{1}{BER} \quad (1)$$

де  $h$  – сумарна ефективність модуляції;  $\eta$  – спектральна ефективність;  $SNR_{loss}$  – енергетичні втрати;  $BW_{loss}$  – втрати у швидкості;  $BER$  – імовірність помилки.

## Методика вибору модуляції

Модуляція Параметри	OFDM без захисного інтервалу	OFDM із захисним інтервалом	OFDM/OQAM
<b>Прототип</b>	$g(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{t_0}}, & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0, & t < 0, t > t_0 \end{cases}$	$g(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T_0}}, & -T_g \leq t \leq t_0 \\ 0, & t < -T_g, t > t_0 \end{cases}$	$g(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{t_0}}, & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0, & t < 0, t > t_0 \end{cases}$
<b>Спектральна ефективність</b>	$h = \frac{b}{TF} = \frac{\log_2 M}{t_0 n_0} = 4$	$h = \frac{b}{TF} = \frac{\log_2 M}{(t_0 + T_g) n_0} = (1 - \frac{T_g}{T_0}) \log_2 M = 3.2$	$h = \frac{0.5 \log_2 M}{t_0 n_0} = \log_2 M = 4$
<b>У частотному домені</b>	$g_{m,n}(t) = e^{j2\pi m F t} g(t - nT)$	$g_{m,n}(t) = e^{j2\pi m n_0 t} g(t - nT_0)$	$g_{m,n}(t) = e^{j(m+n) p / 2} e^{j2\pi m n_0 t} g(t - n t_0)$ $n_0 t_0 = 1/2$
<b>Програш у відношенні сигнал/шум</b>	0	$SNR_{loss} = 10 \log(1 + \frac{T_g}{T}) = 21\% \text{ втрат}$	0
<b>Програш у швидкості</b>	0	$BW_{loss} = \frac{1}{1 + \frac{T_g}{T}} = 17\% \text{ втрат}$	0
<b>BER</b>	$5.23 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$

На рис. 8 подано зіставлення сумарної ефективності різних схем модуляції. Аналізуючи одержані значення, варто відзначити, що OFDM/OQAM є ефективнішою; це забезпечується відсутністю програшу в швидкості та програшу у відношенні сигнал/шум, а також малі значення імовірності бітової помилки дають змогу застосовувати саме цю схему модуляції для технології LTE.



Рис. 8. Сумарна ефективність модулійної схеми

**Застосування технології множинних антен.** Для підвищення швидкості передавання та далькості зв'язку спроектованої мережі запропоновано застосовувати антенну систему MU-MIMO 4 x 4 [1, 243-252] (рис. 9).

При передаванні трафіку від терміналу до базової станції буде задіяна схема, розрахована на багато користувачів (Multi-User MIMO). Вона передбачає наявність єдиної передавальної антени на абонентському терміналі, що дає змогу зменшити вартість останнього. У цій конфігурації з одного й того самого радіоканалу може передаватися висхідний трафік відразу від декількох абонентів, але

до інтерференції це не призведе завдяки застосуванню взаємно ортогональних початкових комбінацій символів у потоках даних.

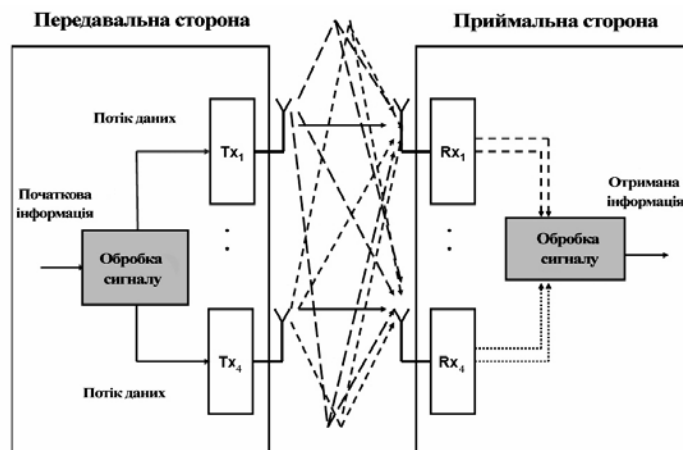


Рис. 9. Запропонована схема побудови системи MU-MIMO 4 x 4 для спроектованої мережі LTE

Використання MIMO (multiple-input and multiple-output) систем у режимі multi-user MIMO (MU-MIMO) 4 x 4 дає змогу [4, с. 81–102]:

- покращити відношення сигнал/шум;
- зменшити інтерференцію сигналів всередині комірки;
- знизити ймовірності бітових помилок.

Це досягається завдяки:

1. Попередньому кодуванню (pre-coding).
2. Використанню методу доступу з просторовим розділенням каналів (SDMA).
3. Застосуванню просторового мультиплексування.
4. Використанню просторово-часового кодування та обробки сигналів.

**Висновки.** Запропоновано концепцію побудови мультисервісної мережі доступу за технологією LTE на основі існуючої мережі UMTS. Введенням удосконалених модуляційної схеми і схеми кодування досягнуто підвищення швидкості та надійності передавання інформації. Здійснено моделювання роботи одного з каналів LTE з метою визначення оптимального способу декодування на основі критерію найменшої імовірності помилки на виході декодера. Виконано порівняльний аналіз трьох різних способів реалізації розділення вхідного потоку по ортогональних каналах (без захисного інтервалу, із захисним інтервалом і у разі використання запропонованої OQAM). Для аналізу було введено параметр сумарної ефективності модуляційної схеми, на основі якого доведено, що оптимальною для застосування в каналі “вниз” є OFDM/OQAM. Доведено, що застосування модуляції OFDM/OQAM дає змогу досягти підвищення швидкості передавання інформації за рахунок усунення циклічного префіксу, характерного для традиційної OFDM. Це уможливилось за рахунок введення квадратурної модуляції зі зсувом (OQAM). Досягнуто покращення енергетичних характеристик систем радіодоступу та підвищення швидкості передавання інформації на основі використання MU-MIMO системи.

1. *LTE – the UMTS long term evolution: from theory to practice* / Stefania Sesia, Matthew Baker, Issam Toufik. – UK, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 611 p. 2. Климаш М.М., Пелішок В.О., Михайленіч П.М. *Технології мереж мобільного зв'язку*. – К.: Освіта України, 2010. – 624 с. 3. *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access* / Harri Holma, Antti Toskala. – UK, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 433 p. 4. *HSPA and LTE for Mobile Broadband. Second edition.* / Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Per Beming. – International: ELSEVIER, 2008. – 608 p.