

УДК 621.396

DOI: 10.31673/2412-9070.2021.012226

Л. В. ДАКОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент;

С. Ю. ДАКОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук;

Р. В. ДУЖИЙ<sup>3</sup>, заступник начальника навч.-наук. центру підготовки офіцерів  
для багатонаціональних штабів;

А. А. ЗАВАЛІЙ<sup>1</sup>, магістр;

М. С. ЗАВАЛІЙ<sup>1</sup>, магістр;

<sup>1</sup> Державний університет телекомунікацій, Київ;

<sup>2</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка;

<sup>3</sup> Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ

## РОЗРОБЛЕННЯ РАДІОМЕРЕЖІ 4-го ПОКОЛІННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЇЇ ПОКРИТТЯ В УМОВАХ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

*Розглянуто приклад того, як в наш час стрімко розвиваються мережі стільникового зв'язку 4-го покоління. Трафік на одного абонента зростає з кожним місяцем. Оператори змушені забезпечувати покриття та необхідну ємність через встановлення нових базових станцій. Якісне планування мережі здатне забезпечити кращу продуктивність мережі та скоротити затрати на розгортання та оптимізацію. Також важливо використовувати інструмент для планування та оптимізації, за допомогою якого можна моделювати покриття мережі та проводити аналіз продуктивності. Досліджено процес планування мережі 4-го покоління LTE в умовах міської забудови, здійснено розрахунки та моделювання покриття.*

**Ключові слова:** стільниковий зв'язок; LTE; покриття радіомережі; енергетичний бюджет; планування покриття; Atoll.

### Вступ

Сьогодні в Україні швидко розвиваються мережі стільникового зв'язку 4G LTE, а отже, з кожним місяцем зростає трафік на одного абонента. Якісне планування забезпечує кращу ефективність роботи мережі та зменшує затрати на розгортання та оптимізацію. Важливим є використання інструмента для оптимізації та планування, за допомогою якого з'являється можливість моделювати покриття та здійснювати аналіз продуктивності мережі.

Формування глобальної мережі в сучасному світі відіграє важливу роль для обміну інформацією, ця роль незаперечна і не потребує підтвердження. За результатами багатьох досліджень, останнім часом у світі істотно зростає обсяг даних, що передається безпроводовими мережами стільникового зв'язку. Зважаючи на те, що будівлі та різні споруди є завадами для проходження сигналу на велику відстань, для однакової площі покриття в різних типах місцевості для якісного надання сигналу потрібне розміщення різної кількості базових станцій. Водночас слід брати до уваги особливості наявної забудови, оскільки сигнали з різних станцій є завадою один для одного. Проте чимала щільність населення вимагає великої ємності мережі для забезпечення потреби щодо швидкості та кількості одночасних підімкнень користувачів.

### Основна частина

Стандарти нових типів безпроводового зв'язку почали з'являтися після впровадження стандарту

1G, створеного 1980 року. Стандарт 1G було засновано на базі аналогових технологій. Цифрові технології стандарту 1G впроваджені в системах 2G. Після аналізу 2G світ зазнав змін та відчув переваги ширококутового швидкісного передавання даних у системах 3G. Стандарт LTE/LTE Advanced, 3GPP, успішно запусив 4G системи в усьому світі, тим самим покращивши швидкість передавання даних на противагу попереднім стандартам зв'язку. Зараз тенденції споживання великих обсягів даних уже наблизились до впровадження систем 5G із новими адаптивними під потреби розробками.

Стандарт LTE, більш відомий як 4G LTE, — це стандарт, який було створено для безпроводового швидкісного зв'язку з обміном даними для сучасних смартфонів, мобільних телефонів та різних типів терміналів передавання даних. З кожним місяцем постійно зростає використаний мобільний трафік, особливо в Україні. До 2024 року прогнозують збільшення трафіку до 130 Екзабайт/міс і понад 80% буде становити відеотрафік. Це пояснюється появою попиту на використання відеосервісів і зростанням популярності та залученості населення до вже наявних. 4G LTE впровадила важливі технології, такі як MIMO, OFDMA, турбокодування тощо. Ці нововведення технологічного характеру пов'язані з фізичним рівнем використання 4G LTE. Фізичний рівень здатен упоратися з усім обробленням даних більш високих рівнів. На фізичному рівні реалізовано різні методи оброблення сигналів, що потрібно для успішного

© Л. В. Дакова, С. Ю. Даков, Р. В. Дужий, А. А. Завалій, М. С. Завалій, 2021

передавання та приймання системи LTE. Отже, розглянемо архітектуру LTE, технології, які потрібні для її використання, прогнозування та покриття в умовах міської забудови.

*Коротко про технологію й елементи,  
необхідні для побудови мережі*

Архітектура LTE (в усіх випусках 3GPP E-UTRAN) формується на базі одного вдосконаленого вузла елементів В (від англ. *enhanced Node B, eNodeB* або *eNB*). Цей вузол включає в себе інтерфейс, який містить протоколи площини керування в напрямку до UE. Елементи eNodeB можуть бути з'єднані між собою, а кожен окремий елемент eNodeB діє як логічний компонент, що обслуговує одну або кілька стільників E-UTRAN. Елементи Home eNodeB — це фемтосоти, які є недорогими елементами, призначеними для покращення покриття на невеликій ділянці. Перевага полягає в тому, що окремий шлюз підтримує велику кількість фемтосот.

Архітектура LTE-Advanced надає можливість розгорнути ретранслятори для підвищення продуктивності мережі. Мета ретрансляторів та елементів HeNodeB полягає в збільшенні покриття та швидкості передавання даних. Стеки протоколів LTE/LTE-Advanced містяться в площині протоколів PDCP, RLC, MAC та PHY, а площина керування складається з RRC протоколів.

Елементи eNodeB та eNB LTE відповідають за радіопередавання/приймання з UE. Так, eNB забезпечує функціональність керування радіоресурсами, контроль приймання, контроль радіоканалу, планування даних користувачів та обмін керуючими повідомленнями. Крім того, eNB контролює виконання шифрування та стиснення заголовків.

Serving Gateway відповідає за маршрутизацію та передавання пакетів даних, керує мобільністю в площині користувача в разі Handover між eNB або вертикального Handover LTE через інтерфейс S4 через ретрансляцію трафіку. S-GW керує контекстами UE, зокрема IP-носієм й інформацією про маршрутизацію, забезпечуючи з'єднання з UE з одного боку та P-GW з другого боку. Залежно від провайдера елементи можуть бути окремими або об'єднані як єдиний елемент. Слід зазначити, що жодного обміну повідомленнями між UE та S-GW не відбувається.

Мережний шлюз пакетного передавання даних (P-GW) забезпечує зв'язок між обладнанням користувача та зовнішніми мережами передавання даних. Роль P-GW полягає в забезпеченні мобільності між різними технологіями. Шлюз P-GW, як і S-GW, забезпечує підімкнення в ланцюжку UE, S-GW і P-GW. P-GW взаємодіє з S-GW і включає в себе функціонал GPRS.

MME діє на рівні керування доступом з LTE. Він скеровує процедури відстеження та з'єднання обладнання користувачів навіть у режимах очікування. Роль MME полягає в процедурах активації та дезактивації каналів, вибираючи потрібні S-GW, коли виконується початкова процедура з'єднання. MME бере участь у сигнальних повідомленнях, які потребують переміщення вузла опорної мережі. MME керує процедурою перевірки належності користувача через HSS.

HSS — це сховище для даних, пов'язаних із абонентами та послугами. HSS включає в себе функціональні можливості реєстра місцевого розташування та центру аутентифікації, а також функціональність IMS. Для підтримання об'єктів домену PS, таких як MME, потрібна функція HLR, що уможливить доступ до послуг домену PS передплатникам. MSC-сервери аналогічно HLR забезпечують підтримання об'єктів домену CS. Для генерування динамічних даних про безпеку AUC зберігає секретний ключ, який використовується для кожного абонента мобільного зв'язку. Мережа LTE охоплює кілька HSS, кількість яких змінюється залежно від географічної структури і кількості абонентів.

На противагу GSM термінали UMTS та LTE не обмежуються лише мобільними телефонами. Ми можемо знайти багато модулів у багатьох звичних приладах як побутового, так і промислового значення для доступу до стільникової мережі. При чому це можуть бути як мобільні, так і стаціонарні пристрої, зокрема модеми, оскільки LTE гарантує достатньо високу швидкість передавання даних для забезпечення доступу до швидкісної мережі.

У LTE зазначено підтримання частотного і часового дуплекса. Частотний дуплекс спектра — це використання двох смуг у двох напрямках для передавання даних, коли ті мають різні смуги та одночасно передають і приймають інформацію. Він є відповідним варіантом для систем, де вимоги пропускну здатності вважаються відносними та симетричними. Для систем із асиметричним передаванням даних часовий дуплекс є більш цікавим варіантом, оскільки частотна смуга залишається використаною повністю.

Смуги частот, затверджені 3GPP для використання в системі LTE, було встановлено для можливості використання в системі UMTS, забезпечуючи змогу спільного використання LTE обома технологіями, оскільки нумерація смуг для UMTS і LTE збігається. Також ці смуги було виділено для можливості використання GSM, надаючи операторам гнучкість у виборі доступного частотного діапазону.

У LTE однією з упроваджених технологій є технологія використання кількох антен MIMO. MIMO використовується протягом багатьох років і не є

новою технологією. Для LTE її застосовують для збільшення пропускної здатності завдяки новому методу доступу OFDMA. MIMO включає в себе просторове мультиплексування, попереднє кодування та рознесення передавання. У LTE просторове мультиплексування реалізують на основі багатопарових структур.

Важливим аспектом стільникового зв'язку є планування. Під час планування мережі LTE радіомережа має балансувати між охопленням та ємністю. Цілі покриття мають відповідати бізнес-вимогам оператора завдяки мінімізації витрат. Водночас слід також оцінювати, наскільки мережа здатна відповідати поточним та майбутнім вимогам ємності. Отже, вимоги до мережі поділяються на вимоги покриття та вимогу пропускної здатності, і обидві подаються окремо.

Планування покриття має забезпечити наявність сигналу з достатньою для зв'язку потужністю, а планування ємності визначає забезпечення доступу до сервісів. У процесі планування покриття визначено такі основні цілі, як частотна смуга, середнє значення потужності прийнятих тестових сигналів, імовірність покриття меж соти території, а вимоги до ємності — швидкість низхідної і висхідної ліній зв'язку та загальна кількість користувачів.

Існують етапи планування, починаючи від аналізу до математичного моделювання, яке відбувається за допомогою комп'ютера і відповідного ПЗ. Проте для розгортання нової мережі або розширення наявної процес планування не є єдиним. Головна мета — забезпечити ефективне вирішення для покриття, відповідної ємності та якості. Залежно від вибраного критерію, покриття або ємності, результат планування може бути різним. Мережа має відповідати вимогам. Фаза починається з підготовки вимог до покриття, а вже потім до ємності. До вимог стосовно покриття належать визначення ділянок покриття, надання сервісів і рівня сигналу. Вимоги до ємності включають у себе прогноз трафіку, тобто моделювання карти покриття пропускної здатності з реалістичним розподілом користувачів на момент часу.

Планування покриття починається з розрахунку енергетичного бюджету для визначення MAPL для обчислення радіуса соти. Як частина номінального планування планування покриття починається зі встановлення значення параметрів енергетичного бюджету. Енергетичний бюджет складається з багатьох похідних, таких як параметри RLB для DL та UL, отримання значення SINR та розрахунок радіуса соти. Параметри енергетичного бюджету можна згрупувати так: параметри, що стосуються поширення і пов'язані з обладнанням; параметри, пов'язані з поширенням, що включають в себе втрати на проникнення,

тіла, фідера та фоновий шум. Визначення радіуса комірки за допомогою відповідної моделі поширення після того, як значення MAPL буде обчислено, буде наступним кроком планування покриття. Після оцінювання розміру покриття станцій та їх підрахунку, здійснюється оцінювання ємності, щоб перевірити, чи може зазначений підрахунок забезпечити користувачів. Ємність — це досяжний набір швидкостей із малою ймовірністю помилки. Метою розгляду ємності є отримання пропускної здатності, що підтримується мережею. Середня пропускна здатність є важливим чинником планування ємності.

Між приймачем і передавачем моделювання каналу імітує зв'язок, яке дозволяє досліджувати MIMO, аналізувати вплив адаптивної модуляції та кодування, відтворювати моделювання каналного коду. Водночас моделювання дає оцінку продуктивності, аналізуючи велику кількість eNodeB. Стільникові мережі, такі як GSM, UMTS і LTE потребують оптимізації після розгортання для забезпечення кращого покриття та підтримання зручної швидкості.

Процес оптимізації мережі, який триває протягом усього часу, включає в себе кілька етапів. Процес оптимізації є ітераційним, без конкретних кроків, як набір послідовних процедур, що характеризують продуктивність мережі та покриття в цільовій ділянці. Цільову продуктивність мережі може бути оцінено за показниками RSRP, SINR та показником успішності передавання. Під час проектування мережі, початкові місця розташування базових станцій виконуються за допомогою інструментів для планування (таблиця). Ці початкові місця можуть бути розміщені як біля дороги, так і біля річки. Параметри антени, такі як азимут і нахили, використовуються рівномірно для всіх базових станцій у цільовій ділянці для ранніх планувальних робіт.

Розрахунок кількості базових станцій  
на основі даних оператора

Параметр	Змінна	Уточнення
Обсяг даних на користувача за місяць	a	Надається оператором
Кількість днів на місяць	b	30 днів
Відношення трафіку в ГНН до трафіку за день	c	Надається оператором
Пропускна здатність на користувача в ГНН, кбіт/с	d	$d = (((a \cdot 8 \cdot 10^6) / b) \cdot c) / 3600$
Середня пропускна здатність на eNodeB, Мбіт/с	e	Надається оператором
Максимальна кількість користувачів на eNodeB	f	$f = (e \cdot 1000) / d$
Загальна кількість користувачів	g	Надається оператором
Необхідна кількість eNodeB	h	$h = g / f$

Оскільки існує багато моделей поширення, які доступні для діапазону 1800 МГц, то їх можна використовувати в різних місцевостях. Вірним є порівняння між різними моделями, щоб з'ясувати, яка модель більш придатна для вибраного типу місцевості. Для порівняння вибираються три популярні моделі поширення: Okumura-Hata, COST 231-Hata та Ericsson 9999. Порівняння моделі поширення здійснюється за допомогою втрат поширення, висоти антени та частоти передавання. Модель COST231-Hata показує максимальну втрату поширення та вибирається для розрахунку радіуса соти. Використовуючи вибрану модель, можна обчислити радіус соти для обох напрямів передавання даних. Зважаючи на те, що всі базові станції будуть трисекторними, можна підрахувати площу покриття однієї з базових станцій та необхідну кількість базових для забезпечення покриття на вибраній ділянці. Планування пропускної здатності можна сформулювати, оцінивши трафік у час найбільшого навантаження відносно трафіку за день. Інструмент для планування та оптимізації — Atoll — використовується для прогнозування радіопокриття, керування мобільними та фіксованими даними абонента, а також для оцінювання ємності мережі та дає можливість планувальнику мережі проектувати безпроводові мережі.

Процес проведення симуляції унаочнює рисунок.

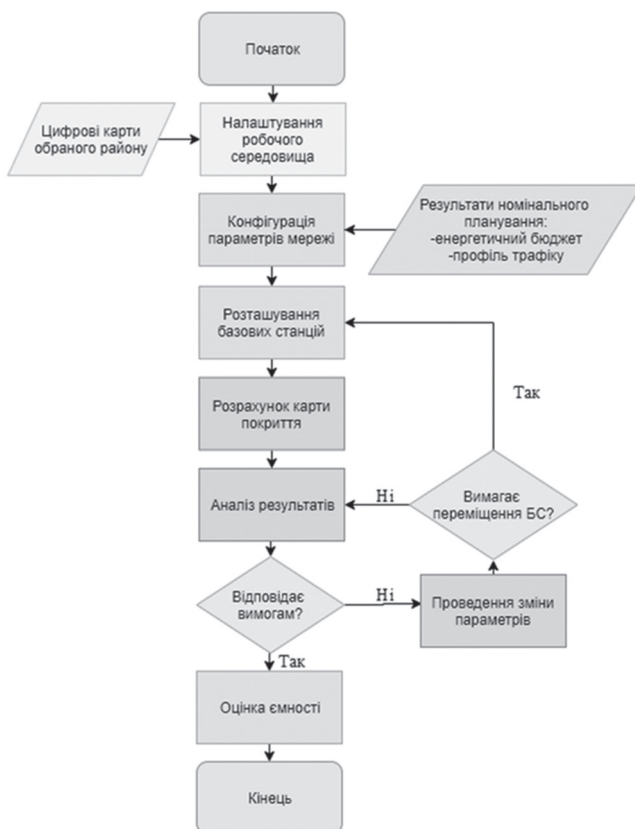


Рис. 1. Процес симуляції за допомогою Atoll

## Висновки

У статті було розглянуто планування мережі безпроводового зв'язку стандарту 4-го покоління LTE. У процесі розгляду основних особливостей мережі було досліджено архітектуру мережі, її основні компоненти, елементи та використання їх функцій. Розглянуто методику розрахунку кількості базових станцій, необхідних для забезпечення покриття та ємності на певній території. Описано похідні елементи формування енергетичного бюджету. Було запропоновано визначення кількості базових станцій за допомогою інструмента для планування та оптимізації Atoll. За результатами сформульовано методи досягнення поставлених цілей. Розглянуто базові параметри оцінювання вимог до ємності мережі, енергетичного бюджету, планування покриття, оптимізація та зроблено акцент на кожному важливому елементі побудови.

## Список використаної літератури

1. Jyrki T. J. Penttinen. *The LTE-Advanced Deployment Handbook. The Planning Guidelines for the Fourth Generation Networks*. England: John Wiley & Sons Ltd., 2016.
2. Poikselkam M. *Voice over LTE (VoLTE)*. England: John Wiley & Sons Ltd., 2012.
3. Ericsson mobility report 2019 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report>
4. Рижков А. Е. *Системи і мережі радіодоступу 4G: LTE, WIMAX*. Лунк, Санкт-Петербург, 2012.
5. ETSI TS 136 306 standart [Електронний ресурс]/3GPP 2019. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136300\\_136399/136306/15.04.00\\_60/ts\\_136306v150400p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136306/15.04.00_60/ts_136306v150400p.pdf)
6. Edwards M. *Leveraging the Use of a Radio Frequency Planning (RFP) Design Tool for Modern System Design* [Електронний ресурс]. URL: [http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Dec13/1312\\_HFE\\_RFplannin g.pdf](http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Dec13/1312_HFE_RFplannin g.pdf),
7. Ayman Elnashar, Mohamed A. El-saidny, Mahmoud R. Sherif. *Design, Development and Performance of 4G-LTE Networks a Practical Approach*. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
8. Jyrki T. J. Penttinen. *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile, and Satellite Systems*. England: John Wiley & Sons Ltd., 2015.
9. Sesia S., Baker M. *LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. Second Edition*. England: John Wiley & Sons Ltd., 2011.
10. Ajay R. Mishra. *Fundamentals of Cellular Network Planning & Optimization*. England: John Wiley & Sons Ltd., 2004.
11. Harri Holma, Antti Toskala. *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced. Second Edition*. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

12. Оліфер В., Оліфер Н. Комп'ютерні мережі. Принципи, технології, протоколи. Підручник для вузів: 5-е вид. 2016. 992 с.

13. Вишне夫斯基 В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMax. Путь к 5G. Москва: Техносфера, 2016. 472 с.

14. Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи. Москва: Техносфера, 2016. 288 с.

15. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Юрчук А. Б. Мережі стільникового зв'язку LTE: технології та архітектура. 2016. 284 с.

16. Гельгор О. Л. Технология LTE стільникової передачі даних. 2017.

17. LTE: взгляд изнутри (Електронний ресурс). URL:

<https://habr.com/ru/post/136317/>

18. 4G. Тренды и перспективы (Електронний ресурс). URL:

<http://1234g.ru/4g/lte/obshchaya-informatsiya-o-standarte-lte/4g-trendy-i-perspektivy>

Л. В. Дакова, С. Ю. Даков, Р. В. Дужий, А. А. Завалей, М. С. Завалей

### РАЗРАБОТКА РАДИОСЕТИ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЕЕ ДЕЙСТВИЯ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Рассмотрен пример того, как в наше время стремительно развиваются сети сотовой связи 4-го поколения. Трафик на одного абонента растет с каждым месяцем. Операторы вынуждены обеспечивать покрытие и необходимую емкость путем установки новых базовых станций. Качественное планирование сети способно обеспечить лучшую производительность сети и сократить затраты на развертывание и оптимизацию. Также важно использовать инструмент для планирования и оптимизации, с помощью которого можно моделировать покрытия сети и проводить анализ производительности. Исследован процесс планирования сети 4-го поколения LTE в условиях городской застройки, выполнены расчеты и моделирование покрытия.

**Ключевые слова:** сотовая связь; LTE; покрытие радиосети; энергетический бюджет; планирование покрытия; Atoll.

L. V. Dakova, S. Yu. Dakov, R. V. Duzhyi, A. A. Zavalay, M. S. Zavalay

### DEVELOPMENT OF THE FOURTH GENERATION RADIO NETWORK AND FORECASTING OF ITS COVERAGE IN THE CONDITIONS OF URBAN DEVELOPMENT

Here is an example of how the fourth generation of cellular networks is developing rapidly today. The traffic per subscriber is growing every month. Operators are forced to provide coverage and the necessary capacity by installing new base stations. Quality network planning can provide better network performance and reduce deployment and optimization costs. It is also important to use a planning and optimization tool to model network coverage and perform performance analysis. According to the results of many studies, the amount of data transmitted over wireless networks has been growing significantly recently. Buildings are obstacles to the signal over long distances, so for the same area in different types of terrain for quality coverage it is necessary to place a different number of base stations. In addition, it is necessary to take into account the peculiarities of the building, as signals from different base stations are an obstacle for each other. On the other hand, high population density requires a large network capacity to meet the needs for speed and number of simultaneously connected users. Traffic is projected to increase by 2024, due to the emergence of new video services and the growing popularity and involvement of the population in existing ones. LTE-Advanced provides the ability to deploy repeaters to increase network performance. In the context of cellular communication systems, an important aspect is radio network planning - the process of locating base stations, determining the frequency channels and radio parameters of a wireless communication system to provide sufficient coverage and connection capacity to ensure the required level of service quality. to the user. Coverage planning refers to a geographic area where the network must provide a signal with sufficient power to provide access to voice or packet services, and capacity planning determines the system's ability to provide services to a given number of subscribers. The purpose of the article is to study the process of planning the fourth generation LTE network in terms of urban development, calculations and modeling of coverage.

**Keywords:** cellular communication; LTE; radio network coverage; energy budget; coverage planning; Atoll.