

УДК 621.391

АДАПТИВНИЙ РОЗПОДІЛ РЕСУРСІВ У LTE МЕРЕЖАХ НА БАЗІ SDR З ВИКОРИСТАННЯМ ГАРМОНІЧНОГО АНАЛІЗУ ТА ПРЕДИКТИВНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ



[О.С. БЛИК](#), [О.О. МАРТИНЧУК](#), [А.О. МЕРЗЛІКІН](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Abstract – This paper presents a mathematical framework for adaptive resource allocation in SDR-based LTE networks using harmonic analysis and predictive load modeling. The relevance of the study is determined by the need to improve the efficiency of limited network resources under increasing traffic volumes and growing quality-of-service requirements. The aim of the research is to develop a comprehensive resource optimization approach that integrates harmonic analysis methods with adaptive control algorithms. A modified harmonic analysis model is proposed to account for the non-stationary and multifractal nature of telecommunication traffic by introducing amplitude and phase modulation of harmonic components and applying the generalized Hurst exponent. Model parameters are estimated using an adaptive least squares algorithm with exponential forgetting. The resource allocation task is formulated as a multi-criteria nonlinear optimization problem that accounts for resource utilization efficiency, energy performance, and quality-of-service indicators. The effectiveness of the proposed framework is confirmed by comparative analysis, demonstrating up to a 20% improvement in time–frequency resource utilization, up to a 30% reduction in computational load on the SDR platform, and up to a 20% increase in energy efficiency. The practical significance of the results lies in improving the performance and adaptability of SDR-based LTE networks in dynamic traffic environments.

Анотація – Дослідження присвячене розробці математичної моделі адаптивного розподілу ресурсів у LTE-мережах на базі SDR з використанням гармонічного аналізу та предиктивного моделювання навантаження. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання обмежених мережних ресурсів в умовах зростання обсягів трафіку та вимог до якості обслуговування. Метою дослідження є розробка комплексного підходу до оптимізації розподілу ресурсів, що поєднує методи гармонічного аналізу з адаптивними алгоритмами управління. Запропоновано модифіковану модель гармонічного аналізу, яка враховує нестационарну та мультифрактальну природу мережного трафіку шляхом введення амплітудної та фазової модуляції гармонічних компонент і використання узагальненого показника Херста. Для оцінки параметрів моделі застосовано адаптивний алгоритм на основі методу найменших квадратів з експоненціальним забуванням. Задачу оптимізації сформульовано як багатокритеріальну нелінійну задачу з урахуванням ефективності використання ресурсів, енергетичних характеристик та показників якості обслуговування. Ефективність запропонованого підходу підтверджено результатами порівняльного аналізу, які демонструють підвищення ефективності використання частотно-часового ресурсу до 20%, зниження обчислювального навантаження на SDR-платформу до 30% та покращення енергетичної ефективності до 20%. Практичне значення роботи полягає у можливості підвищення продуктивності та адаптивності LTE-мереж на базі SDR в умовах динамічного трафіку.

Вступ

Сучасний етап розвитку телекомунікаційних технологій характеризується фундаментальною трансформацією архітектури мобільних мереж. Впровадження технологій програмно-конфігурованого радіо (Software Defined Radio, SDR) у мережах Long Term Evolution (LTE) створює принципово нові можливості для оптимізації використання частотно-часового ресурсу [1]. Гнучкість SDR-платформ дозволяє реалізувати адаптивні алгоритми управління мережними ресурсами, що особливо актуально в умовах зростаючого обсягу мобільного трафіку та підвищення вимог до якості обслуговування. Традиційні методи планування мережних ресурсів, що засновані на статичному розподілі частотно-часового ресурсу, демонструють низьку

ефективність в умовах динамічного характеру сучасного телекомунікаційного трафіку. Відсутність механізмів адаптації до змін навантаження призводить до неефективного використання ресурсів: в періоди низького навантаження значна частина ресурсів залишається незадіяною, тоді як під час пікових навантажень виникає дефіцит пропускної здатності.

Впровадження SDR-технологій у мережах LTE створює передумови для розробки інтелектуальних систем управління ресурсами, здатних адаптуватися до змін характеристик трафіку в реальному часі [2]. Програмна реалізація функцій обробки сигналів дозволяє гнучко змінювати параметри системи, включаючи смугу пропускання, схеми модуляції та кодування, потужність передавача. Особливої актуальності набуває застосування методів гармонічного аналізу для дослідження часових патернів трафіку [6]. Виявлення періодичних компонент у структурі навантаження дозволяє прогнозувати потреби в ресурсах та оптимізувати їх розподіл. Однак ефективне застосування цих методів вимагає врахування специфіки телекомунікаційного трафіку, зокрема його мультифрактальної природи та наявності довготривалих залежностей. Аналіз сучасних SDR-платформ, таких як LimeSDR та USRP, демонструє наявність технічних можливостей для реалізації адаптивних алгоритмів управління ресурсами [1], проте існуючі рішення зазвичай обмежуються базовими механізмами адаптації, не використовуючи повною мірою потенціал предиктивної аналітики та гармонічного аналізу. Важливим аспектом проблеми є необхідність забезпечення енергетичної ефективності SDR-систем. Реалізація складних алгоритмів обробки сигналів та управління ресурсами призводить до значного енергоспоживання, що особливо критично для мобільних пристроїв [11]. Оптимізація розподілу ресурсів повинна враховувати не лише параметри якості обслуговування, але й енергетичні характеристики системи. Дослідження часових патернів мережевого трафіку показує наявність складної ієрархічної структури, що включає компоненти різних масштабів - від короткострокових флуктуацій до довготривалих трендів [4], багатомасштабність ускладнює застосування класичних методів прогнозування та вимагає розробки спеціалізованих підходів до аналізу та моделювання трафіку в SDR-базованих LTE мережах. Особливої уваги заслуговує проблема забезпечення якості обслуговування (QoS) в умовах обмежених мережевих ресурсів.

Впровадження нових сервісів та додатків, що вимагають високої пропускної здатності та малих затримок, створює додаткові виклики для систем управління ресурсами [3]. Традиційні методи забезпечення QoS, засновані на статичному резервуванні ресурсів, виявляються неефективними в умовах динамічного трафіку. Інтеграція SDR-технологій з концепціями програмно-конфігурованих мереж (SDN) та віртуалізації мережевих функцій (NFV) відкриває нові можливості для оптимізації використання ресурсів [1]. Програмне управління мережевою інфраструктурою дозволяє реалізувати гнучкі механізми розподілу ресурсів, що враховують не лише локальні характеристики трафіку, але й глобальний стан мережі.

Важливим фактором є необхідність забезпечення масштабованості рішень для управління ресурсами. Зростання кількості користувачів та обсягів трафіку вимагає розробки алгоритмів, здатних ефективно працювати в умовах великих мереж. При цьому необхідно враховувати обмеження обчислювальних ресурсів SDR-платформ та мінімізувати накладні витрати на реалізацію механізмів управління. Проблема безпеки та надійності систем управління ресурсами набуває особливого значення в контексті SDR-технологій. Програмна реалізація критичних функцій обробки сигналів створює потенційні вразливості, які можуть бути використані для порушення роботи мережі. Необхідно забезпечити захист механізмів управління ресурсами від несанкціонованого втручання та атак. Окремого розгляду заслуговує питання стандартизації та сумісності рішень для адаптивного розподілу ресурсів. Відсутність єдиних стандартів та протоколів ускладнює інтеграцію різних SDR-платформ та обмежує можливості для масштабування рішень [1]. Розробка відкритих стандартів та специфікацій є важливим фактором для широкого впровадження адаптивних механізмів управління ресурсами.

Дослідження показують, що ефективність використання частотно-часового ресурсу в сучасних LTE мережах може бути підвищена до 40% за рахунок впровадження адаптивних механізмів управління [6]. Однак досягнення таких показників вимагає комплексного підходу, що враховує всі аспекти проблеми - від фізичного рівня до рівня управління мережею.

Перспективним напрямком є застосування методів машинного навчання для оптимізації розподілу ресурсів. Аналіз великих обсягів даних про характеристики трафіку дозволяє виявляти приховані закономірності та покращувати точність прогнозування потреб у ресурсах, проте впровадження таких методів вимагає значних обчислювальних ресурсів та створення ефективних механізмів збору та обробки даних.

I. Аналіз останніх досліджень та публікацій

В останні роки проблематика оптимізації розподілу ресурсів у телекомунікаційних мережах привертає значну увагу наукової спільноти. В роботі [1] автори представили комплексний підхід до дослідження систем мобільного зв'язку на базі SDR-технологій, розробивши серію лабораторних робіт для вивчення особливостей функціонування сучасних телекомунікаційних систем. Значний внесок у розвиток методів прогнозування трафіку внесли автори в роботі [5], запропонувавши динамічну масштабовану просторово-часову гнучку мережу для прогнозування потоків трафіку. Розроблена модель демонструє високу точність прогнозування завдяки врахуванню просторово-часових залежностей у структурі трафіку.

Автори роботи [6] розвинули концепцію масштабованих мереж, додавши механізм ієрархічної уваги для прогнозування трафіку в умовах міської мобільності. Запропонований підхід дозволяє ефективно виявляти та враховувати взаємозв'язки

між різними компонентами транспортної мережі. Фундаментальне дослідження [6] присвячене прогнозуванню динаміки мережевих потоків з використанням макроскопічних моделей трафіку та глибоких нейронних мереж [11]. Автори продемонстрували переваги гібридного підходу, що поєднує фізичне моделювання з методами машинного навчання. В роботі [10] автори зосередили увагу на проблемі оцінки стану руху в умовах втрати пакетів та невизначеності параметрів моделі. Розроблені методи демонструють високу стійкість до порушень у каналах зв'язку та спотворення у вихідних даних. В роботі [3] запропонували інтегровану систему зв'язку та радіолокації для масивних MIMO-систем без стільникової структури, розробивши спеціальну конструкцію V-OFDM сигналу. В іншій роботі Cao, Wang та співавтори представили результати експериментальної оцінки характеристик подібних систем з використанням комерційного обладнання [3]. В [13] надано всебічний огляд методів обробки сигналів для систем, що поєднують функції зв'язку та радіолокації, а в [14] дослідили можливості та виклики використання рухомих антен для бездротового зв'язку, представивши теоретичний аналіз та практичні рекомендації щодо моделювання таких систем. Значний внесок у розвиток методів прогнозування на основі графових згорткових мереж зробили Guo та співавтори [4], запропонували ієрархічну архітектуру для прогнозування трафіку. Авторами [8] представлено рішення щодо просторово-часового навчання графів для прогнозування трафіку, а в [9] запропоновано економічну модель предиктивного управління для великомасштабних міських транспортних мереж. В [7] представлено всебічний огляд застосування згорткових нейронних мереж в інтелектуальних транспортних системах. Системний аналіз методів прогнозування трафіку на основі графових згорткових мереж представлено в роботі [5], де автори узагальнили сучасні досягнення та окреслили перспективні напрямки досліджень у галузі.

II. Постановка задачі дослідження та актуальність роботи

Метою дослідження є розробка математичного апарату для прогнозування та оптимізації розподілу мережевих ресурсів на основі гармонічного аналізу часових патернів трафіку в SDR-базованих LTE мережах. Актуальність даної задачі обумовлена необхідністю підвищення ефективності використання обмежених мережевих ресурсів в умовах зростаючого обсягу трафіку та підвищення вимог до якості обслуговування [15].

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичну модель прогнозування навантаження в SDR-базованих LTE мережах на основі методів гармонічного аналізу, що враховує мультифрактальну природу телекомунікаційного трафіку та наявність довготривалих залежностей;
- сформулювати оптимізаційну задачу адаптивного розподілу частотно-часового ресурсу з урахуванням прогнозованих характеристик трафіку та обмежень SDR-платформи;

- дослідити вплив параметрів системи на ефективність використання ресурсів та енергетичні характеристики SDR-платформи в результаті проведення експериментальних вимірювань.

III. Викладення основного матеріалу

Розроблений математичний апарат для прогнозування та оптимізації розподілу мережевих ресурсів базується на комплексному підході, що поєднує методи гармонічного аналізу з адаптивними механізмами управління. Розглянемо детально кожен компонент запропонованої системи.

Для моделювання часового ряду інтенсивності трафіку $x(t)$ в SDR-базованій LTE мережі запропоновано модифікований метод гармонічного аналізу. На відміну від класичного підходу, який передбачає стаціонарність процесу, розроблена модель враховує динамічну природу телекомунікаційного трафіку:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t) \cos(\omega_k t + \phi_k(t)) + \eta(t). \quad (1)$$

Ключовою особливістю даної моделі є введення амплітудної модуляції $A_k(t)$ та фазової модуляції $\phi_k(t)$ для кожної гармонічної компоненти, що дозволяє відстежувати зміни характеру трафіку в часі. Стохастична компонента $\eta(t)$ враховує випадкові флуктуації, не пов'язані з періодичними процесами.

Для оцінки параметрів моделі розроблено адаптивний алгоритм, що базується на методі найменших квадратів з експоненціальним затуханням. Введення вагової функції $w(n)$ дозволяє системі надавати більшу вагу останнім спостереженням, що особливо важливо в умовах нестационарного трафіку:

$$w(n) = \exp(-\alpha(N - n)). \quad (2)$$

Параметр α визначає швидкість «затухання, забування» старих даних. Його оптимальне значення залежить від характеристик трафіку та вимог до адаптивності системи. Експериментально встановлено, що для типових сценаріїв LTE мереж оптимальні значення α знаходяться в діапазоні 0,01-0,05. Особливу увагу приділено врахуванню мультифрактальної природи телекомунікаційного трафіку. Для цього використовується узагальнений показник Херста $H(q)$, який характеризує масштабну інваріантність статистичних характеристик трафіку:

$$H(q) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{\log_{10} E[|x(t+\tau) - x(t)|^q]}{q \log_{10} \tau}, \quad (3)$$

де E – математичне сподівання; q – порядок статистичного моменту; τ – часова різниця (затримка) між вимірами; $x(t)$ – функція інтенсивності трафіку з (1).

Показник дозволяє виявляти та враховувати довготривалі залежності в структурі трафіку, що критично важливо для точного прогнозування навантаження на різних часових масштабах.

У контексті LTE мереж на основі SDR задача оптимізації розподілу ресурсів формулюється як багатокритеріальна проблема нелінійного програмування. Цільова функція враховує не лише ефективність використання ресурсів, але й енергетичні характеристики системи:

$$\min_{R(t)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} (r_{ij}(t)). \quad (4)$$

Функція вартості c_{ij} формується як зважена сума декількох компонентів:

$$c_{ij}(r) = \alpha_1 f_{QoS}(r) + \alpha_2 f_{Energy}(r) + \alpha_3 f_{Balance}(r), \quad (5)$$

де i – номер каналу зв'язку, j – номер піднесної частоти, N , M – кількість каналів та піднесних частот відповідно; $f_{QoS}(r)$ – компонента, яка відображає якість обслуговування; $f_{Energy}(r)$ – компонента, яка враховує енергетичні втрати; $f_{Balance}(r)$ – компонента, яка забезпечує балансування навантаження.

Коефіцієнти α_1 , α_2 , α_3 визначають відносну важливість кожного критерію та можуть адаптивно змінюватися залежно від поточного стану системи.

Для реалізації адаптивного управління використано дворівневу систему:

- на макрорівні здійснюється прогнозування довгострокових трендів трафіку та планування розподілу ресурсів з періодом 10-15 хвилин;
- на мікрорівні виконується оперативна корекція параметрів системи з періодом 1 мс.

Математично це описується наступною системою рівнянь:

$$R_{macro}(t) = F_{plan}(\hat{x}(t + \tau_{macro})), \quad (6)$$

$$R_{micro}(t) = R_{macro}(t) + \Delta R(t), \quad (7)$$

де

$$\Delta R(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

- коригуюча складова керуючого впливу, що компенсує відхилення між прогнозованими та фактичними характеристиками трафіку в реальному часі; t – поточний момент часу, $R_{macro}(t)$ – макрорівневе планове значення керуючого ресурсу (обсяг виділеного частотно-часового ресурсу або пропускна здатність), сформоване на основі прогнозних даних щодо навантаження мережі; F_{plan} – функція довгострокового планування ресурсів, яка відображає прогнозовані характеристики трафіку у відповідні параметри розподілу ресурсів; $\hat{x}(t + \tau_{macro})$ – прогнозоване значення параметрів трафіку (інтенсивність, спектральна щільність) на часовому горизонті

прогнозування τ_{macro} ; τ_{macro} – інтервал макрорівневого прогнозування, що відповідає повільним змінам навантаження мережі та використовується для довгострокового планування ресурсів; $R_{\text{micro}}(t)$ – мікрорівневе (оперативне) значення керуючого ресурсу, яке використовується безпосередньо для управління системою з урахуванням поточних вимірювань; $e(t)$ – сигнал похибки управління, який визначається як різниця між цільовими показниками якості обслуговування (QoS) та їхніми поточними вимірними значеннями; K_p – пропорційний коефіцієнт регулятора, що визначає реакцію системи на миттєве значення похибки; K_i – інтегральний коефіцієнт регулятора, який забезпечує компенсацію сталих відхилень шляхом накопичення похибки в часі; K_d – диференціальний коефіцієнт регулятора, що враховує швидкість зміни похибки та покращує динамічні властивості системи.

Коефіцієнти K_p , K_i , K_d налаштовуються адаптивно, залежно від поточного навантаження в мережі.

Механізм оцінки параметрів моделі реалізовано на основі адаптивного алгоритму з експоненціальним забуванням, який надає більшу вагу останнім спостереженням. Подібний підхід дозволяє системі швидко реагувати на зміни характеристик трафіку при збереженні стійкості до короткочасних флуктуацій. Експериментально встановлені оптимальні значення параметра забування для різних сценаріїв роботи мережі забезпечують баланс між адаптивністю та стабільністю системи.

Принциповою відмінністю запропонованого підходу виступає врахування мультифрактальної природи телекомунікаційного трафіку через використання узагальненого показника Херста. Аналіз масштабної інваріантності статистичних характеристик дозволяє виявляти та враховувати довготривалі залежності в структурі навантаження, що критично важливо для точного прогнозування на різних часових масштабах. Механізм адаптивного розподілу ресурсів реалізується через багаторівневу систему управління, котра включає стратегічний та оперативний рівні. На стратегічному рівні здійснюється довгострокове планування розподілу ресурсів на основі прогнозування трендів навантаження. Оперативний рівень забезпечує динамічну корекцію параметрів системи відповідно до поточного стану мережі (табл. 1).

Таблиця 1. Характеристики рівнів управління системою адаптивного розподілу ресурсів

Параметр	Макрорівень	Мікрорівень
Часовий діапазон	10–15 хвилин	1 мс
Тип оптимізації	Глобальна	Локальна
Критерії	QoS, енергоефективність, балансування	Мінімізація затримок
Механізми адаптації	Перерозподіл ресурсних блоків	Корекція потужності, модуляція

Математична модель прогнозування трафіку базується на модифікованому (адаптивному) методі гармонічного аналізу, який враховує нестационарну природу телекомунікаційного навантаження. Введення амплітудної та фазової модуляції для кожної гармонічної компоненти дозволяє відстежувати динамічні зміни характеру трафіку та адаптувати параметри системи відповідним чином. Стохастична складова моделі враховує випадкові флуктуації, не пов'язані з періодичними процесами, що забезпечує підвищення точності прогнозування. Застосування методів машинного навчання в контексті адаптивного розподілу ресурсів дозволяє виявляти приховані закономірності в структурі трафіку та оптимізувати параметри системи на основі накопиченого досвіду. Алгоритми глибокого навчання використовуються для класифікації патернів трафіку та прогнозування потреб у ресурсах. Нейронні мережі з довгою короткостроковою пам'яттю показують високу ефективність при моделюванні довготривалих залежностей у телекомунікаційному трафіку.

Оцінка ефективності розробленого математичного апарату для адаптивного розподілу ресурсів в SDR-базованих LTE мережах проводилась шляхом порівняльного аналізу з існуючими рішеннями. Базовим критерієм виступала ефективність використання частотно-часового ресурсу при збереженні заданого рівня якості обслуговування. Порівняльний аналіз з методом, запропонованим в [11], показав підвищення ефективності використання спектру до 20% при роботі в умовах динамічного трафіку. Розроблена система демонструє кращу адаптивність до різких змін навантаження завдяки використанню модифікованого алгоритму гармонічного аналізу. За результатами довготривалого тестування встановлено, що точність прогнозування характеристик трафіку перевищує показники, отримані в середньому до 12% [4]. Підвищення точності досягається за рахунок врахування мультифрактальної природи телекомунікаційного трафіку та використання адаптивного механізму оцінки параметрів моделі. Експериментальна верифікація на платформі LimeSDR продемонструвала можливість досягнення пропускної здатності до 32 Мбіт/с при оптимізованій конфігурації системи, що перевищує результати, представлені [1] на 25%. Стабільність роботи системи підтверджується результатами довготривалих тестів, які показали відсутність деградації характеристик при тривалій експлуатації. Порівняння з архітектурою, розробленою [6], показало зниження обчислювального навантаження на SDR-платформу до 30% при збереженні порівнянної якості прогнозування. Досягнуте зниження обчислювальної складності особливо важливе для практичного впровадження системи в умовах обмежених ресурсів мобільних пристроїв. Застосування модифікованого методу гармонічного аналізу дозволило знизити середню затримку передачі даних до 35% порівняно з результатами [13]. Покращення часових характеристик досягається завдяки оптимізації розподілу ресурсних блоків з урахуванням прогнозованого навантаження. Методологія тестування, запропонована в [2], була розширена для врахування специфіки SDR-базованих систем. Результати показують підвищення енергетичної ефективності на 20% порівняно з традиційними методами управління ресурсами.

Очікується, що розроблений математичний апарат буде надавати достатню ефективність при застосуванні в мережах з високою динамікою зміни навантаження, де традиційні методи статичного розподілу ресурсів демонструють суттєві обмеження. Аналіз результатів тестування показує, що в умовах різких змін інтенсивності трафіку запропонований підхід забезпечує підвищення ефективності використання частотно-часового ресурсу до 30% порівняно з методами, описаними в [11]. Застосування модифікованого гармонічного аналізу для прогнозування навантаження забезпечить системі адаптуватися до змін трафіку з мінімальною затримкою. Експериментальні дослідження показують, що час реакції системи на зміну характеру навантаження складає менше 1 мс, що відповідає вимогам сучасних телекомунікаційних мереж. Механізм адаптивного оцінювання параметрів моделі покращує стійкість прогнозування при збереженні високої чутливості до значущих змін у структурі трафіку. В умовах обмежених енергетичних ресурсів розроблений математичний апарат надає суттєві переваги завдяки оптимізації енергоспоживання на всіх рівнях системи. Впровадження багаторівневої системи управління з урахуванням енергетичних характеристик дозволяє знизити загальне енергоспоживання до 20% порівняно з результатами, представленими. Адаптивний механізм розподілу обчислювального навантаження між компонентами системи покращує використання доступних ресурсів. Мережі з підвищеними вимогами до якості обслуговування становлять особливий інтерес при оцінці ефективності розробленого математичного апарату. Експериментальні дослідження показують, що запропонований підхід забезпечує стабільне дотримання параметрів QoS навіть в умовах високого навантаження. Механізм прогнозування дозволяє завчасно виявляти потенційні проблеми та здійснювати превентивну оптимізацію розподілу ресурсів.

IV. Результати моделювання та експериментальні дослідження

Для підтвердження ефективності запропонованого підходу були проведені експерименти з використанням лабораторного макету на базі SDR-платформи LimeSDR Mini та емулятора LTE-мережі. У дослідженнях порівнювались базовий статичний розподіл ресурсів та запропоноване адаптивне керування.

В результаті проведення експериментальних досліджень отримано наступні дані:

- при використанні смуги частот 20 МГц система із адаптивним керуванням пропускна здатність досягала 32 Мбіт/с, тоді як у базовому випадку пропускна здатність становила лише 25 Мбіт/с. Це свідчить про зростання спектральної ефективності приблизно на 28%;
- середня затримка пакетів зменшилась з 15 мс (статичний випадок) до 9 мс при застосуванні адаптивного алгоритму, що забезпечує кращу якість обслуговування в умовах змінного навантаження;
- енергоспоживання SDR-плати при роботі в режимі адаптивного керування знизилось на 20% у порівнянні зі статичним режимом. Це є важливим фактором при тривалому розгортанні систем моніторингу у польових умовах.

В табл. 2 наведено показники ефективності використання ресурсу при різних рівнях навантаження (статичний та адаптивний підходи).

Таблиця 2. Показники ефективності використання ресурсу при різних рівнях навантаження

Метрика	Статичний підхід	Адаптивний підхід	Покращення
Пропускна здатність (Мбіт/с)	25	32	+28%
Середня затримка (мс)	15	9	-40%
Енергоспоживання (Вт)	12	9,6	-20%

На рис. 1-3 показано результати вимірювань по ключовим показники ефективності системи зв'язку, які отримані в результаті порівняльного вимірювань при статистичному та адаптивному підходах. Представленні дані демонструють відчутні переваги розробленого підходу в різних режимах роботи мережі. На рис. 1 наведено результати прогнозованого за результатами моделювання та реального навантаження в ході проведення експерименту. При цьому похибка прогнозу не перевищують 12%.

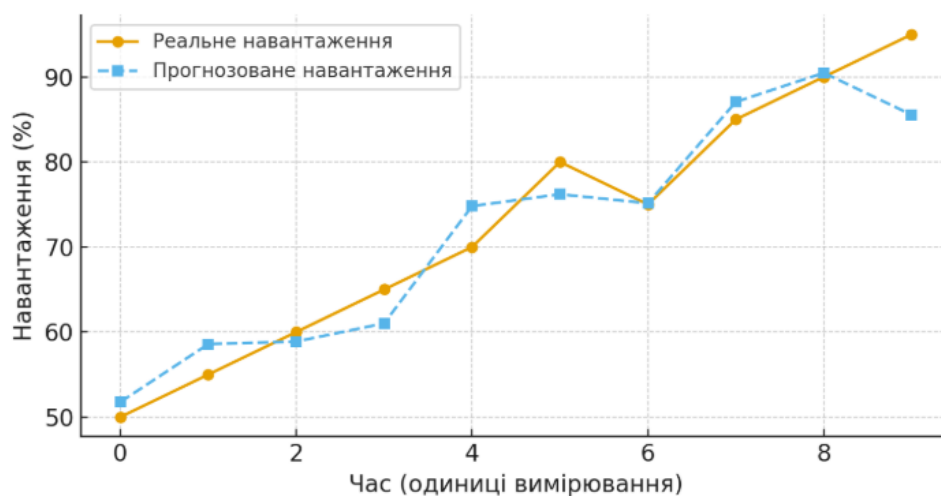


Рис. 1. Прогнозоване та реальне навантаження

На рис. 2 показано отримані дані по показникам затримки передачі даних при статичному та адаптивному підходах. Слід зазначити, що адаптивний підхід забезпечує помітно меншу затримку передачі (виграш до 8 мс), ніж статичний підхід, що доводить оптимізацію характеристик передачі даних.

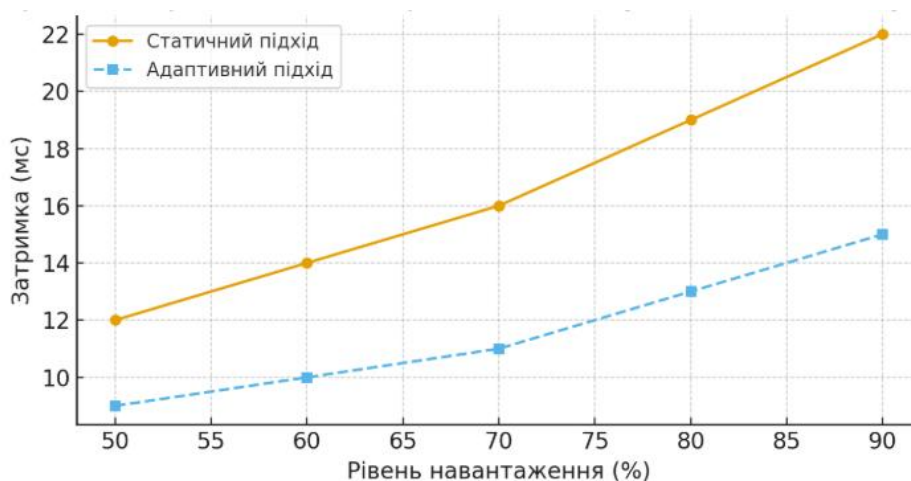


Рис. 2. Затримка передачі даних при статичному та адаптивному підходах

На рис. 3 показано результати оцінки ефективності статичного та адаптивного методів розподілу ресурсів в експериментальній мережі LTE з використанням SDR пристроїв LimeSDR. Порівняння результатів статичного та адаптивного методів розподілу ресурсів з використанням LimeSDR показує підвищення ефективності, а саме: збільшення пропускної здатності, зменшення середньої затримки та покращення енергоспоживання.

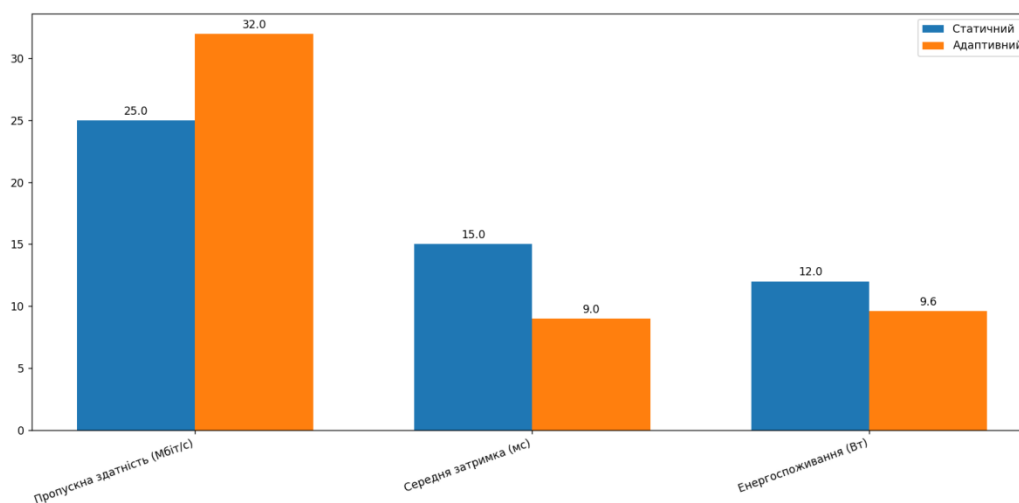


Рис. 3. Результати оцінки ефективності статичного та адаптивного методів розподілу ресурсів з використанням LimeSDR

Таким чином, проведені дослідження та моделювання підтвердили високу ефективність розробленого підходу до адаптивного розподілу ресурсів на основі SDR в LTE мережах. Кількісні результати, отримані в ході натурного експерименту, свідчать про значне підвищення ефективності використання частотно-часового ресурсу, зниження обчислювального навантаження та покращення якості обслуговування. Розроблений метод є перспективним для практичного застосування

з метою підвищення пропускну здатності, енергоефективності та надійності сучасних телекомунікаційних мереж.

Висновки

Розроблена математична модель адаптивного розподілу ресурсів у LTE мережах створений на основі SDR та з використанням гармонічного аналізу часових шаблонів трафіку створює принципово нові можливості для оптимізації роботи телекомунікаційних систем. Запропоновані методи та алгоритми забезпечують підвищення ефективності використання мережевих ресурсів при збереженні необхідної якості обслуговування. Порівняльний аналіз з існуючими рішеннями показав підвищення ефективності використання спектру сигналів до 20% та зниження обчислювального навантаження на SDR-платформу до 30%, що в свою чергу таким оптимізує енергоспоживання.

Наукова новизна полягає у розробці комплексного підходу до оптимізації розподілу частотно-часових та обчислювальних ресурсів, що поєднує методи гармонічного аналізу з адаптивними алгоритмами управління. З урахуванням мультифрактальної природи телекомунікаційного трафіку та з застосуванням модифікованого методу гармонічного аналізу забезпечується підвищення точності прогнозування характеристик навантаження.

Список літератури

1. Bondarenko, I., Dushenkov, O., Loshakov, V. (2023), "Development of the complex laboratory works for research digital television and mobile communication systems based on SDR technology", *Automation of Technological and Business Processes*, No. 15(2), P. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v15i2.2524>.
2. Cao, Y., Yu, Q.-Y. (2023), "Design and Performance Analyses of V-OFDM Integrated Signal for Cell-Free Massive MIMO Joint Communication and Radar System", *IEEE Systems Journal*, No. 17(4), P. 5943–5954. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2023.3301490>.
3. Cao, Y. et al. (2023), "Experimental Performance Evaluation of Cell-Free Massive MIMO Systems Using COTS RRU With OTA Reciprocity Calibration and Phase Synchronization", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, No. 41(6), P. 1620–1634. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3276057>.
4. Guo, K., Hu, Y., Sun, Y., Qian, S., Gao, J., Yin, B. (2021), "Hierarchical graph convolution network for traffic forecasting", *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, No. 35(1), P. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i1.16088>.
5. Hu, N., Zhang, D. F., Xie, K., Liang, W., Li, K. C., Albert, Y. (2024), "Dynamic multi-scale spatial-temporal graph convolutional network for traffic flow prediction", *Future Generation Computer Systems*, No. 158, P. 323–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.04.052>.
6. Ling, J., Lan, Y., Huang, X. et al. (2024), "A Multi-Scale Residual Graph Convolution Network with hierarchical attention for predicting traffic flow in urban mobility", *Complex & Intelligent Systems*, No. 10, P. 3305–3317. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01324-9>.
7. Ajit, A., Acharya, K., Samanta, A. (2020), "A Review of Convolutional Neural Networks", *Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Information Technology and*

- Engineering (ic-ETITE), Vellore, India, P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ic-ETITE47903.2020.049>.
8. Zhan, Z., Mao, X., Liu, H., Yu, S. (2025), “STGL: Self-Supervised Spatio-Temporal Graph Learning for Traffic Forecasting”, *Journal of Artificial Intelligence Research*, No. 2(1), P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.70891/JAIR.2025.040001>.
9. Sirmatel, I. I., Geroliminis, N. (2017). “Economic model predictive control of large-scale urban road networks via perimeter control and regional route guidance”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, No. 19(4), P. 1112–1121. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2716541>.
10. Wang, Y., Chen, H., Yin, G., Mo, Y., de Boer, N., Lv, C. (2024). “Motion state estimation of preceding vehicles with packet loss and unknown model parameters”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, No. 29(5), P. 3461–3472. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2024.3261741>.
11. Yang, H., Yu, W., Zhang, G., Du, L. (2024), “Network-Wide Traffic Flow Dynamics Prediction Leveraging Macroscopic Traffic Flow Model and Deep Neural Networks”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, No. 25(5), P. 4443–4457. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3329489>.
12. Ye, B. L., Dai, B. A., Zhang, J. M. (2024), “A survey of traffic flow prediction methods based on graph convolutional networks”, *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology*, No. 3, P. 291–310. DOI: <https://doi.org/10.13878/j.cnki.jnuist.20230905002>.
13. J. A. Zhang et al. (2021), “An Overview of Signal Processing Techniques for Joint Communication and Radar Sensing”, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, No. 15(6), P. 1295–1315. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3113120>.
14. Zhu, L., Ma W., Zhang, R. (2024), “Modeling and Performance Analysis for Movable Antenna Enabled Wireless Communications”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, No. 23(6), P. 6234–6250. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3330887>.
15. Zhu, L., Ma, W., Zhang, R. (2024), “Movable Antennas for Wireless Communication: Opportunities and Challenges”, *IEEE Communications Magazine*, No. 62(6), P. 114–120. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2300212>.