

Міхненко Я.О.

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОСЛУГ ДЛЯ БАГАТОКОРИСТУВАЧЬКОГО СЕРЕДОВИЩА В КОГНІТИВНІЙ РАДІОМЕРЕЖІ

У даній роботі досліджено застосування технології когнітивного радіо (Cognitive Radio Technology, CRT) з метою оптимізації використання обмеженого радіочастотного спектра та забезпечення високої якості обслуговування (QoS) у багатокористувацькому середовищі. У зв'язку зі стрімким розвитком мобільної індустрії та зростанням кількості користувачів мобільних пристроїв, ключовим завданням операторів зв'язку стає ефективне управління спектральними ресурсами, що дозволяє уникнути перевантаження мережі, знизити затримки та запобігти втраті даних. Для вирішення цього завдання було запропоновано два нових підходи: метод локалізації з урахуванням локалізованості (Localizability Aided Localization, LAL) та метод наповнення водою (Water Filling).

У рамках дослідження проведено порівняльний аналіз класичних протоколів маршрутизації – AOMDV (Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing) та AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector). Для реалізації запропонованих методів базовий протокол AODV було доповнено алгоритмами AOMDV та DSR, що дозволило інтегрувати LAL і Water Filling відповідно. Розроблені рішення спрямовані на оптимізацію маршрутизації та раціональний розподіл потужності між каналами, що є критично важливим у когнітивних радіомережах із наявністю первинних (PU) та вторинних (SU) користувачів.

Моделювання здійснювалося з використанням інструменту Network Simulator 2 (NS-2), а оцінка продуктивності виконувалася за трьома ключовими метриками: пропускна здатність (throughput), коефіцієнт доставки пакетів (Packet Delivery Ratio, PDR) та затримка (delay). Результати експериментів показали, що метод LAL на основі протоколу AOMDV забезпечує вищу пропускну здатність та мінімальну затримку, тоді як метод Water Filling, реалізований у поєднанні з DSR, демонструє кращі показники PDR. У свою чергу, традиційний алгоритм AODV поступається обом удосконаленим рішенням за всіма обраними параметрами.

Таким чином, у роботі доведено, що запропоновані методи здатні істотно підвищити якість обслуговування користувачів у когнітивних радіомережах. Впровадження методик LAL та Water Filling дозволяє не лише раціональніше використовувати спектральні ресурси, але й створює основу для подальшої інтеграції в системи нового покоління, де вимоги до QoS та QoE будуть ще більш критичними. Отримані результати можуть бути корисними для розробників протоколів маршрутизації, операторів мобільних мереж та дослідників у сфері бездротових комунікацій.

Ключові слова: когнітивні радіомережі, якість обслуговування, маршрутизація, оцінка продуктивності.

Постановка проблеми. В умовах інтенсивного технологічного розвитку та швидкого зростання мобільної індустрії, щоденне збільшення кількості користувачів мобільних пристроїв висуває на перший план проблему забезпечення повсюдного доступу до мережі. Протягом наступних двох-трьох десятиліть постачальники мережевих послуг стикнуться з низкою викликів, пов'язаних із наданням якісного доступу до радіочастотного спектра. Зокрема, у контексті зростання абонентської бази особливо гостро постає завдання

підтримки високої якості обслуговування (QoS) в умовах дефіциту радіочастотного ресурсу.

Зважаючи на майбутнє впровадження технологій 5G/6G, суспільство потребуватиме безперешкодного доступу до радіочастотного спектра для стабільного функціонування різноманітних сервісів. Це створює потенційний ризик виникнення так званого «вузького місця» (bottleneck) для операторів зв'язку. Отже, в умовах одночасного користування мережею значною кількістю абонентів, ключовим завданням стає ефективне

використання наявного спектра, що гарантує мінімальні затримки та запобігає втраті даних.

Метою роботи є розв'язання проблеми забезпечення високої якості обслуговування (QoS) в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу. Основним завданням дослідження є мінімізація втрат і затримок у мережі. У рамках роботи розглядається модель мережевого середовища, що передбачає взаємодію первинних (PU) та вторинних (SU) користувачів.

У ході дослідження було проаналізовано передачу сигналу від первинного користувача (PU) до вторинного користувача (SU). Застосування різних алгоритмів дозволило провести порівняльний аналіз таких ключових параметрів, як затримка, пропускна здатність та коефіцієнт доставки пакетів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У праці [1] досліджено механізм спільного використання ресурсів кількома мережевими вузлами. Ці вузли розташовані на оптимальній відстані від джерела постачання та працюють з мінімальною затримкою. Автори порівняли динамічну та статичну схеми, застосувавши динамічний підхід для оптимізації затримки. Завдяки такому рішенням вдалося досягти зменшення рівня відмов на 20%, що сприяло підвищенню якості обслуговування (QoS). Водночас у роботі не було проаналізовано джитер, який є одним із важливих показників для оцінки продуктивності мережесистем.

У статті [2] досліджено оптимальний розподіл потужності у багатокористувацькій когнітивній радіомережі (CRN) з метою максимізувати загальну ефективну пропускну здатність мережі з урахуванням обмежень на потужність та вимог щодо захисту первинних користувачів (PU). Запропоновано два ітераційні алгоритми, які, однак, є обчислювально складними. На противагу цьому, у даній роботі представлено простий та ефективний підхід.

Робота [3] зосереджена на проблемах розподілу каналів і вибору мережі в гетерогенних мережах 5G. Запропоновано дві двоцільові моделі, перша модель передбачала розподіл вторинних користувачів (SU) між мережами з урахуванням таких параметрів, як вартість, доступна швидкість передавання даних та допустимий рівень інтерференції, а у другій моделі первинні вузли (PN) були розподілені за каналами, а вторинні користувачі – призначені до каналів, виходячи з їхніх додаткових вимог щодо низької затримки.

Однак, запропонована модель складається з великої кількості обчислень та математичних виразів, що дуже ускладнює валідацію даних.

У статті [4] представлено метод інтелектуального динамічного розподілу спектра. Він ґрунтується на виборі найбільшого доступного спектрального інтервалу для досягнення максимально можливої швидкості передавання даних. Автори запропонували теоретичну модель для визначення ймовірного розподілу довжини цього інтервалу. Однак, оскільки ця модель є гіпотетичною, вона дає змогу моделювати будь-яку кількість каналів, але не враховує практичних сценаріїв.

У роботі [5] проведено аналіз оптимальної стратегії розподілу ресурсів для заглушення (jamming) у двоканальній системі зв'язку типу ALOHA з тривалими затримками, що включає численні термінали когнітивного радіо. У зв'язку з розподілом ресурсів для заглушення спостерігається незначне збільшення затримки передавання.

У роботі [6] досліджено розподілену схему розподілу потужності, що ґрунтується на підході Н-альфа керування. Їхнє дослідження враховує затримку та мінливість коефіцієнта підсилення каналу в когнітивній радіомережі (CRN). Автори стверджують, що підвищення ефективності зв'язку досягається завдяки запропонованому алгоритму розподілу потужності. Крім того, вони зазначають, що такі вдосконалені рішення є перспективними для застосування в технології 5G.

У роботі [7] досліджено ефективність генетичних алгоритмів як інтелектуального методу керування. Метою було визначення оптимальних параметрів поширення та передавання радіосигналу з урахуванням впливу навколишнього середовища та обмежень щодо якості обслуговування (QoS). Однак, зазначена стаття аналізує параметри передавання лише для одного каналу.

У роботі [8] проаналізовано ефективність забезпечення якості обслуговування (QoS) у гетерогенних системах із великою кількістю різнорідних вузлів шляхом застосування різних методів оптимізації. Результати дослідження показують, що приріст продуктивності за рахунок використання модуля AQUA у гетерогенних 5G-системах з різними радіодоступними мережами (RAN) є вищим за умови наявності більшої кількості доступних гетерогенних вузлів.

У статті [9] розширюється розуміння майбутніх мереж п'ятого покоління, акцентуючи увагу на концепції QoE. Крім того, аналізується вплив ключових викликів, що пов'язані з 5G, на якість досвіду користувачів, про що також йдеться у джерелах сучасній літературі.

У роботі [10] досліджено стратегії вибору спектра для когнітивної радіомережі (CRN) та

запропоновано підхід до порівняння алгоритмів вибору каналів на основі основних експлуатаційних параметрів з метою зменшення загального часу прийняття рішень. Основна мета – мінімізувати загальний час роботи системи при збереженні ефективної продуктивності.

Виклад основного матеріалу. З метою підвищення якості обслуговування (QoS) користувачів, у роботі запропоновано застосування двох методів: локалізації з урахуванням локалізованості (LAL) та Water Filling. Для їх реалізації було обрано протоколи маршрутизації AOMDV та DSR відповідно. Крім того, в роботі розглядається техніка балансування навантаження, в основі якої лежить базовий протокол маршрутизації AODV. Важливо зазначити, що протокол AOMDV забезпечує встановлення нових маршрутів за запитом, створює петльонезалежні вузли, підтримує стабільне з'єднання та вирізняється високою ефективністю під час відновлення після збоїв [11; 12].

Метод локалізації є поширеною технікою у багатьох мережевих системах. Запропонований у даній роботі підхід ґрунтується на використанні протоколу маршрутизації AOMDV.

Однак, цей метод має певне обмеження, яке полягає у необхідності побудови карти вершин. У реальних системах, мережі не завжди є повністю локалізованими, що призводить до наявності теоретично нелокалізованих вузлів.

Метод LAL (Localizability Aided Localization) складається з трьох ключових етапів:

- перевірка локалізованості вузлів;
- корекція мережі;
- побудова дерева сегментів.

З огляду на локалізованість вузлів, усі модифікації, що вносяться методом LAL, є обґрунтованими та доцільними.

На основі результатів моделювання буде продемонстровано, як метод LAL (Localizability Aided Localization) забезпечує ефективне керування процесом корекції та підвищення продуктивності мережі.

Алгоритм Water Filling є оптимальним рішенням для максимізації енергії каналу з динамічними частотними характеристиками, оскільки він адаптивно регулює передану потужність відповідно до коефіцієнта підсилення каналу. У цій роботі запропоновано інтеграцію керування потужністю за допомогою алгоритму Water Filling з протоколом маршрутизації DSR (Dynamic Source Routing) для підвищення пропускної здатності когнітивної радіосистеми.

Традиційна реалізація алгоритму Water Filling не може бути безпосередньо застосована в ког-

нітивних системах через наявність додаткових обмежень щодо потужності. З огляду на це, в даній роботі алгоритм реалізується ітераційно для досягнення оптимального керування передачею. Застосування ітераційного підходу дозволяє ефективно вирішити задачу розподілу потужності, одночасно знижуючи обчислювальну складність.

Розглянуто зразкову когнітивну радіомережу (CRN), яка включає первинних (Primary Users) та вторинних (Secondary Users) користувачів. У ній вузли з позначеннями P1–P8 виконують роль первинних, а вузли S1–S4 – вторинних користувачів. На прикладі цієї мережі демонструється передавання даних від вузла P5 до вузла S2, де вузол P5 є ініціатором передачі, а S2 – приймачем.

У процесі передавання застосовуються запропоновані методи, які визначають критерії вибору наступного вузла для подальшої маршрутизації до кінцевого пункту призначення.

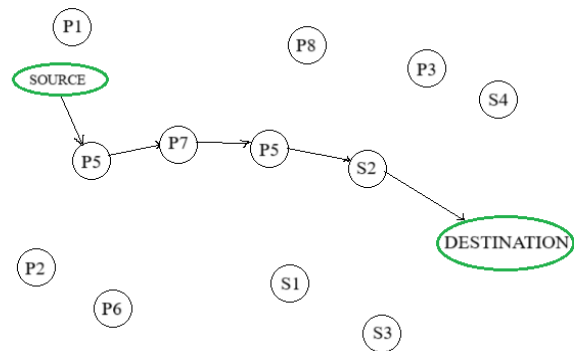


Рис. 1. Процес обміну інформації між вузлами

На рис. 1 візуалізовано процес обміну інформацією між вузлами, що ілюструє передачу даних від джерела до пункту призначення. Вибір наступного вузла для подальшої маршрутизації здійснюється відповідно до застосованого алгоритму.

Результати моделювання отримані на основі цієї схеми передачі з використанням різних алгоритмів для кожного окремого сценарію. Порівняльний аналіз, проведений для кожного з алгоритмів, базується на трьох ключових показниках: пропускній здатності (throughput), затримці (delay) та коефіцієнті доставки пакетів (PDR – packet delivery ratio).

Ідеальну мережу, представлену на рис. 2-3, було змодельовано за допомогою інструменту Network Simulator 2 (NS-2). Програмний код симуляції реалізовано мовою TCL (Tool Command Language).

Симуляція проводилася відповідно до послідовності, зображеної на рисунку 3. Було змодельовано та порівняно три методики:

1. Локалізація з урахуванням локалізованості (LAL), що базується на протоколі маршрутизації AOMDV.

2. Метод Water Filling, який використовує протокол маршрутизації DSR (Dynamic Source Routing).

3. Існуючий підхід, а саме – алгоритм згладжування навантаження (Load-based Smoothing Algorithm), реалізований на основі протоколу AODV.

Результати моделювання цих трьох методик наведено нижче для порівняльного аналізу.

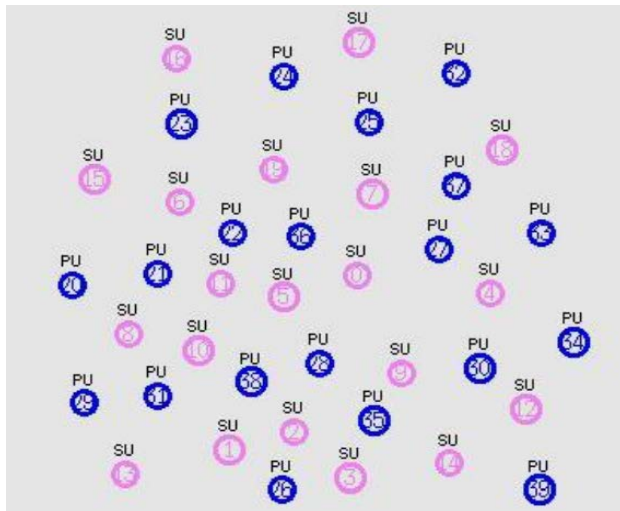


Рис. 2. Представлення ідеальної мережі в застосунку NS-2

Згідно з результатами моделювання, представленими на рисунку 4, найбільший коефіцієнт доставки пакетів спостерігається у протоколу

DSR. Це пояснюється його унікальними особливостями та високою ефективністю. Водночас, протокол AOMDV демонструє кращі результати у порівнянні з традиційним AODV.

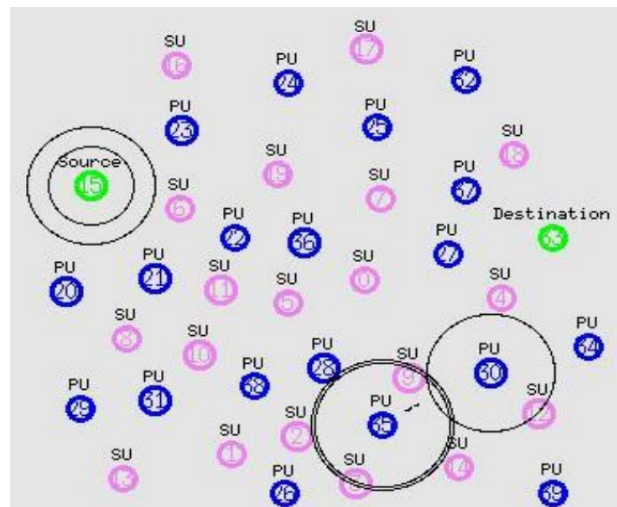


Рис. 3. Представлення процесу обміну інформації між вузлами в застосунку NS-2

Згідно з результатами моделювання, представленими на рисунку 4, найбільший коефіцієнт доставки пакетів спостерігається у протоколу DSR. Це пояснюється його унікальними особливостями та високою ефективністю. Водночас, протокол AOMDV демонструє кращі результати у порівнянні з традиційним AODV.

Коефіцієнт пропускної здатності, представлений на рис. 5, визначається як обсяг даних, що успішно передано з однієї точки в іншу за певний проміжок часу.

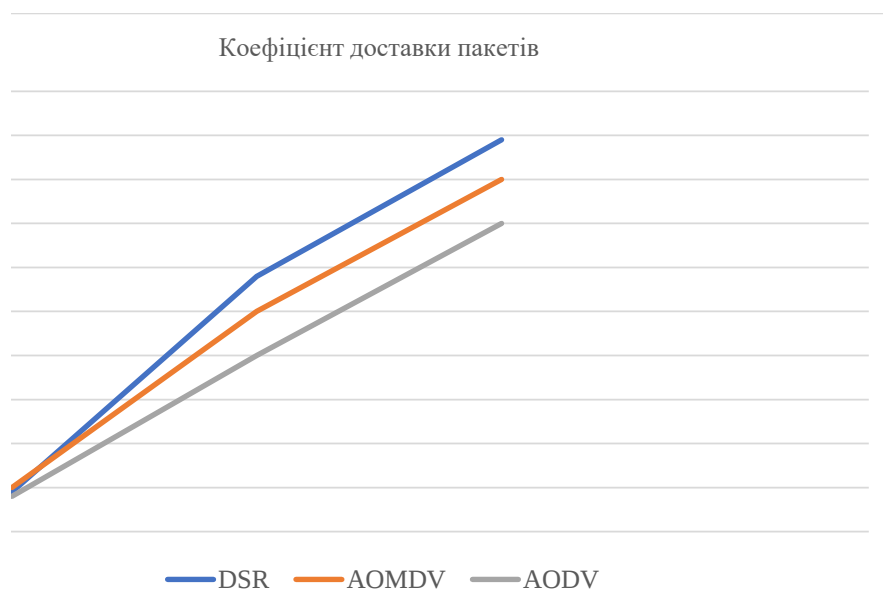


Рис. 4. Відношення часу до коефіцієнту доставки пакетів

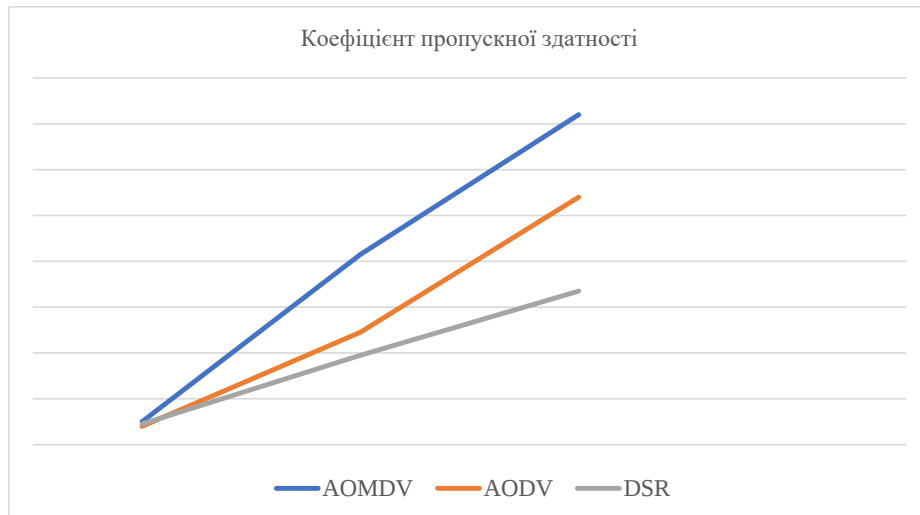


Рис. 5. Відношення часу до коефіцієнту пропускної здатності

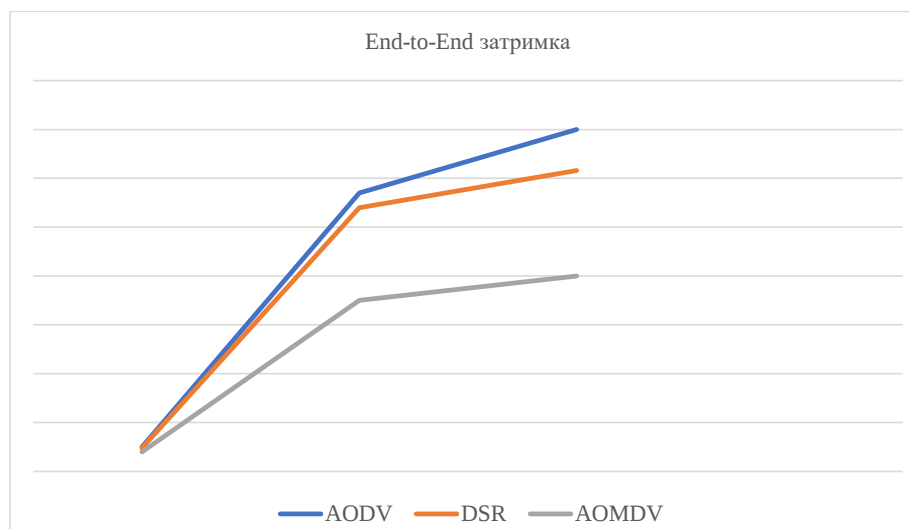


Рис. 6. Відношення часу до передачі пакетів

Згідно з результатами моделювання, наведеними на рис.5, видно, що пропускна здатність є вищою для протоколу AOMDV у порівнянні з DSR та AODV. Протокол AOMDV демонструє високу ефективність у передаванні даних між вузлами за короткий проміжок часу.

Отже, виходячи з результатів моделювання, наведених на рис. 4 і 5, якщо пріоритетом є вищий коефіцієнт доставки пакетів (PDR) навіть за умови певних втрат, доцільно обрати алгоритм DSR.

Натомість, якщо метою є висока пропускна здатність, тобто передавання великого обсягу даних за короткий час, навіть із певними втратами, оптимальним вибором буде техніка AOMDV.

У роботі аналізуємо три ключові показники: пропускну здатність (throughput), затримку (delay) та коефіцієнт доставки пакетів (PDR).

Результати цього аналізу представлені у вигляді графіків, отриманих під час моделювання.

Коефіцієнт доставки пакетів визначається як співвідношення кількості пакетів, надісланих від вузла-джерела до вузла-призначення, до загальної кількості переданих пакетів.

Результати моделювання затримки «точка-точка» (point-to-point delay) представлено на рис. 6.

Згідно з отриманими даними, алгоритм AOMDV демонструє найменшу затримку порівняно з AODV та DSR. Другим за ефективністю є DSR, який також перевершує традиційний алгоритм AODV за цим показником.

Таким чином, результати моделювання підтверджують, що запропоновані алгоритми AOMDV та DSR є ефективнішими за традиційний AODV щодо часу затримки.

Висновки. У цій роботі проведено моделювання передачі даних від вузла-ініціатора до вузла-призначення в когнітивній радіомережі.

Були використані та порівняні такі протоколи маршрутизації, як AOMDV, DSR та AODV.

З метою підвищення ефективності були запропоновані два методи: локалізація з урахуванням локалізованості (LAL), реалізована на основі

протоколу AOMDV, та метод Water Filling, що використовує протокол DSR. Крім того, як існуючий підхід було розглянуто алгоритм балансування навантаження, що функціонує на протоколі DSR.

Список літератури:

1. Satyanarayan K, Padaganur and Jayashree D.Mallapur, 'Load sharing based on optimized qos parameters for heterogeneous networks, 4th Int'l Conf. on Recent Advances in Information Technology, 2018, DOI:10.1109/RAIT.2018.8389088.
2. Samoda Gamage, Duy T. Ngo, and Jamil Y. Khan, "Statistical DelayQoS Driven Resource Allocation for Multiuser Cognitive Radio Networks", 2018 IEEE *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, DOI: 10.1109/WCNC.2018.8377062.
3. Mara Bukvi, Bogdana Stanojević, Milan Stanojević, "Multiple Objective Channel Allocation Problem in 5G Networks", 2018 7th *International Conference on Computers Communications and Control (ICCCC)*, DOI: 10.1109/ICCCC.2018.8390454.
4. Sepehr Khodadadi, Dongyu Qiu, and Yousef R. Shayan, "Performance Analysis of Secondary Users in Cognitive Radio Networks with Dynamic Spectrum Allocation", 2018.2844366, *IEEE*, DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2844366.
5. Rong Shi and Yue Xiao, "Jamming Strategy Optimization for DualChannel ALOHA Network with Long Time Delay", 2018 10th *International Conference on Communication Software and Networks*, DOI: 10.1109/ICCSN.2018.8488223.
6. Shuying Zhang and Xiaohui Zhao, "Distributed Power Allocation for Cognitive Radio Networks with Time-Varying Channel and Delay: H1 State Feedback Control Approach", 2018.2873804, *IEEE Access*, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2873804.
7. Saranga Sarma, Manmohan Singh, and Rajendra Pamula, "Design of Cognitive Engine for Cognitive Radio Network using MOGA", 4th Int'l Conf. on Recent Advances in Information Technology, RAIT-2018, DOI: 10.1109/RAIT.2018.8389072.
8. Shuminoski T., Gavrilovska L., Janevski T. "QoS Performances of Heterogeneous Networks with multiple Radio Access Technologies", *IEEE EUROCON 2017*, 6–8 JULY 2017, DOI: 10.1109/EUROCON.2017.8011091.
9. Laura Pierucci. "The quality of experience perspective toward 5G technology", *IEEE Wireless Communications*, August 2015, DOI: 10.1109/MWC.2015.7224722.
10. Kyryk M., Pleskanka N., Yanyshyn V. Performance evaluation model for spectrum decision methods in cognitive radio, 2017 *IEEE*. DOI:10.1109/CADSM.2017.7916137
11. Subitha D., Mathana J.M. 2018, 'Design of Low Complexity Hybrid Precoder and Inkjet Printed Antenna Array for Massive MIMO Downlink Systems', *International Journal of Antennas and Propagation*, ISSN: 1687-5869, DOI:10.1155/2018/4315128
12. Subitha D., Mathana J.M. A Novel Low Complexity Downlink linear precoding Algorithm for Massive MIMO Systems', *Springer, Journal of Cluster Computing*, 2018. ISSN: 1386–7857. DOI: 10.1007/s10586-018-2050-1

Mikhnenko Ya. O. ANALYSIS OF WAYS TO IMPROVE THE QUALITY OF SERVICES FOR A MULTI-USER ENVIRONMENT IN A COGNITIVE RADIO NETWORK

This study investigates the application of Cognitive Radio Technology (CRT) for optimizing the use of the limited radio frequency spectrum and ensuring high Quality of Service (QoS) in a multi-user environment. With the rapid development of the mobile industry and the growing number of mobile device users, effective spectrum resource management has become a key task for network operators, allowing them to avoid network congestion, reduce delays, and prevent data loss. To address this challenge, two novel approaches have been proposed: Localizability Aided Localization (LAL) and the Water Filling method.

Within the framework of this study, a comparative analysis of classical routing protocols – AOMDV (Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing), and AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) – has been conducted. To implement the proposed methods, the baseline AODV protocol was extended with AOMDV and DSR algorithms, enabling the integration of LAL and Water Filling, respectively. The developed solutions are aimed at optimizing routing and achieving efficient power allocation across channels, which is critically important in cognitive radio networks with the presence of primary users (PU) and secondary users (SU).

The modeling was carried out using the Network Simulator 2 (NS-2) tool, and performance evaluation was conducted based on three key metrics: throughput, Packet Delivery Ratio (PDR), and delay. The experimental

results showed that the LAL method, implemented on top of the AOMDV protocol, provides higher throughput and minimal delay, while the Water Filling method, integrated with DSR, demonstrates better PDR performance. In turn, the traditional AODV algorithm lags behind both enhanced solutions across all selected parameters.

Thus, the study demonstrates that the proposed methods can significantly enhance the Quality of Service (QoS) for users in cognitive radio networks. The implementation of LAL and Water Filling not only enables more efficient utilization of spectral resources but also provides a foundation for future integration into next-generation systems, where QoS and QoE requirements will become even more critical. The obtained results may be useful for routing protocol developers, mobile network operators, and researchers in the field of wireless communications.

Key words: *cognitive radio networks, quality of service, routing, performance evaluation.*

Дата надходження статті: 07.09.2025

Дата прийняття статті: 25.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025