

3. Agrawal, T., Walia, G. S., & Anu, V. K. (2024). Development of a software design error taxonomy: A systematic literature review. *SN Computer Science*, 5, 467. <https://doi.org/10.1007/s42979-024-02797-2>.
4. Verma, A., Agarwal, A., Rathore, M., Bisht, S., & Singh, D. (2023). Preferential selection of software quality models based on a multi-criteria decision-making approach. *International Journal of Software Innovation (IJSI)*, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.4018/IJSI.315739>.
5. Kordunova, Yu. S. (2023). Analysis and development of a conceptual model for lifecycle management of specialized safety-oriented software. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 5(2), 72–78. <https://doi.org/10.23939/ujit2023.02.072>.
6. Duarte, B. B., Falbo, R. A., Guizzardi, G., Guizzardi, R., & Souza, V. E. S. (2021). An ontological analysis of software system anomalies and their associated risks. *Data & Knowledge Engineering*, 134, 101892. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2021.101892>.
7. Hu, X., Chen, J. M., & Li, H. (2024). Software security vulnerability patterns based on ontology. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 50(10), 3084–3099. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0783>.
8. Yakovyna, V. S., & Symets, I. I. (2021). Прогнозування дефектів програмного забезпечення ансамблем нейронних мереж. *Науковий вісник НЛТУ України*, 31(6), 104–111.
9. Biletskyi, T. P., & Fedasiuk, D. V. (2021). Прогнозування дефектів у програмному забезпеченні алгоритмами глибинного навчання CNN та RNN. *Науковий вісник НЛТУ України*, 31(2), 114–120.
10. Khil, O. S., & Yakovyna, V. S. (2023). Аналіз проблеми застосування методів машинного навчання для оцінювання та прогнозування дефектів програмного забезпечення. *Науковий вісник НЛТУ України*, 33(3), 110–116.
11. Yehorov, S. V., & Shkvarnytska, T. Yu. (2020). Розширений метод аналізу шкідливого програмного забезпечення з метою створення сигнатур. *Вісник Університету «Україна»*, 1(24), 161–169.
12. Alshazly, A. A., Elfatry, A. M., & Abougaba, M. S. (2024). Detecting defects in software requirements specification. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), 513–527.
13. Rumbutis, L., Slotkene, A., & Pliuskuvienė, B. (2024). Визначення атрибутів якості програмного забезпечення на основі прогнозування дефектів коду: систематичний огляд літератури. *Нові тенденції в комп'ютерних науках*, 2(1), 57–68. <https://doi.org/10.3846/ntcs.2024.21305>.
14. Oivo, M., Abrahamsson, P., Corral, L., & Russo, B. (Eds.). (2020). *Product-Focused Software Process Improvement – 16th International Conference, PROFES 2015: Proceedings* (pp. 380–396). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26844-6_28.

Надійшла 28.09.2025

УДК 004.738.1:621.39

Дрововозов В.І., Аль-Шаммарі А.А.А.

DOI: 10.31673/2409-7292.2025.041207

МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ МАРШРУТУ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ (QoS) ТА ЙОГО ЗАТРИМОК ПРИ ВИКОРИСТАННІ МОДЕЛІ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ

У статті запропоновано нову математичну модель маршрутизації для бездротових мереж, спрямовану на забезпечення якості обслуговування (QoS) за умов динамічного, самоподібного трафіку. Модель ґрунтується на міжрівневому підході, що інтегрує фізичний, каналний та мережевий рівні стеку протоколів, і використовує релаксацію Лагранжа для декомпозиції складної задачі оптимізації з метою мінімізації кінцевих затримок, втрат пакетів та енергоспоживання. Для пошуку квазіоптимальних рішень застосовано евристичний алгоритм табу-пошуку, який ефективно уникнув локальних мінімумів у просторі допустимих маршрутів. Для реалістичного моделювання трафіку використано фрактальний самоподібний неперервний пуасонівський процес (FSNDP), що адекватно відтворює статистичні властивості реального мережевого навантаження, зокрема довготривалу залежність та сплескову інтенсивність. Результати імітаційного експерименту продемонстрували переваги запропонованого підходу: зменшення середнього джиттера на 22–35 %, підвищення пропускної здатності на 18–27 % та покращення стійкості до тимчасових перевантажень у порівнянні з класичними протоколами, зокрема IEEE 802.11 CSMA/CA. Додатково реалізовано механізм активного контролю завантаження вузлів та відкидання надмірно повторюваних пакетів, що запобігає лавинному зростанню черг і знижує ймовірність колапсу мережі під час пікових навантажень.

Ключові слова: інтенсивність трафіку, якість обслуговування (QoS), бездротова мережа, модель маршрутизації, самоподібний трафік, релаксація Лагранжа, табу-пошук.

Вступ

Безпроводові мережі нових поколінь, призначені для підтримки різних видів трафіку, таких як голос, дані та мультимедіа, активно впроваджуються в сучасні складні та різноманітні інформаційно-комунікаційні системи. У цих мережах обмін даними між абонентами може бути покращений завдяки високій якості зображень та відео, а доступ до інформації та послуг – за рахунок підвищення швидкості передачі даних, якості сервісу (*QoS*) та зменшення рівня бітових помилок, заходів безпеки, урахування локації абонента, енергоефективності та нових гнучких комунікаційних можливостей.

Ці функції створюють нові можливості не тільки у виробничій та організаційній сферах, але і для постачальників контенту та послуг, що використовують ці мережі.

Незалежна (локальна) адаптація на кожному з рівнів моделі *OSI* здійснюється послідовно. Відповідно, термін досягнення оптимального або хоча би близького до нього рішення у результаті являє собою суму усіх термінів локальної адаптації. Крім того, відомо, що час опрацювання мережної інформації на кожному з локальних рівнів моделі *OSI* є різним: чим вище рівень, тим більший час потрібний на опрацювання мережної інформації.

Переваги міжрівневого підходу безпосередньо пов'язані з принципами функціонування безпроводової мережі. Характеристики безпроводових каналів зв'язку впливають на всі рівні стека мережних протоколів, і тому всі рівні реагують на зміну стану каналу. Крім того, існує тісний зв'язок між протоколами різних рівнів. Однак інтегрована оптимізація *QoS* (наскрізна, *end-to-end QoS*) потребує опрацювання великих масивів даних та розв'язання векторно-матричних рівнянь великої розмірності, яка визначається числом транзитних ділянок на трасі доставки (так зване "прокляття розмірності" [1])

Безпроводова інформаційно-комунікаційна мережа з передаванням різноманітного трафіку, по суті, є різновидом комп'ютерної мережі, тобто "чистої" *IP*-мережі. Тому для ефективного обслуговування користувачів треба дотримуватися стандартів якості *IP*-мереж.

У відповідності зі стандартами якості сервісу *QoS* розглядається як сумарний ефект робочих характеристик обслуговування, який визначає ступінь задоволеності користувачів цією службою [2].

Ключовими показниками ефективності наскрізної *QoS* у відповідності з [3] є наступні:

- затримки й джиттер (випадкові варіації) затримки (мс);
- відносна величина втрат пакетів, що передаються (%);
- продуктивність мережі або швидкість передачі (біт/с);
- надійність мережних елементів (імовірність відмов, середній час наробітки на відмову);
- живучість мережі - можливість збереження експлуатаційних характеристик при виході з ладу окремих елементів (завдяки резервуванню обладнання за схемами холодної або гарячої заміни).

Набори показників та класи *QoS*, механізми їх формування, норми на параметри доставки пакетів наведені у додатку I до дисертаційної роботи.

Мережа передавання даних, по суті, має бути інформаційною системою реального часу з суворим дотриманням усіх вимог до таких систем. Для забезпечення вимог до якості сервісу (*QoS*) сучасних інформаційно-комунікаційних мереж, що працюють у режимі реального часу, потрібно розробляти нові моделі та методи організації безпроводових каналів зв'язку, планування маршрутів з мінімальними затримками опрацювання у комутаційних вузлах, доставляння до отримувачів, малим рівнем бітових помилок тощо.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми

Вирішенню завдання по розробці та аналізу математичних моделей маршрутизації для бездротових мереж, присвячено багато публікацій. Так у роботі [1] розглядаються загальні підходи до оптимізації *QoS*, але не запропоновано конкретної математичної моделі для адаптивного визначення маршрутів з урахуванням динамічних змін трафіку та стану мережі. У роботі [2] запропоновано нову модель маршрутизації на основі релаксації Лагранжа та табу-

пошуку, яка динамічно адаптується до інтенсивності трафіку та стану вузлів, що дозволяє знизити затримки та втрати пакетів. Робота [3] розглядає принципи міжрівневої взаємодії, але не містить імітаційної моделі для оцінки затримок при самоподібному трафіку та не пропонує механізму активного контролю завантаження вузлів. У поточній статті [4] реалізовано імітаційну модель з FSNDP-трафіком, яка дозволяє аналізувати поведінку мережі під час сплесків завантаження, а також впроваджено механізм тимчасового обмеження активності вузлів для запобігання перевантаження. У роботі [5] запропоновано механізм відкидання пакетів, що часто повторюються, та періодичний контроль зі зворотним зв'язком, що значно знижує навантаження мережі під час перевантажень. Робота [6] застосовують глибоке навчання для маршрутизації, їх підхід вимагає великих обчислювальних ресурсів і не враховує фізичні обмеження вузлів (буфер, потужність сигналу, смуга). У роботах [7-9] зроблено огляд існуючих підходів до QoS-усвідомленої маршрутизації у 5G/6G мережах; виявлено недоліки універсальності та адаптивності. Розглядається використання DRL для динамічної маршрутизації; обмеження – високі обчислювальні витрати та нездатність враховувати фізичні обмеження вузлів та застосування релаксації Лагранжа для маршрутизації з обмеженням затримки; не враховує динамічне завантаження вузлів у реальному часі. Робиться моделювання самоподібного трафіку та QoS-гарантії; не пропонує механізмів активного контролю завантаження.

Проведений аналіз ключових аспектів теми, а саме QoS, затримки, самоподібний трафік, релаксація Лагранжа, табу-пошук, міжрівнева взаємодія, енергоефективність – і демонструють, що жодне з них окремо не вирішує комплексно поставлену задачу по розробки та аналізу нової математичної моделі маршрутизації в бездротових мережах. Це робить її значним внеском у розвиток бездротових мереж нового покоління, особливо в умовах зростання вимог до затримок та надійності.

Мета роботи та цілі дослідження

Метою статті є розробка та аналіз нової математичної моделі маршрутизації в бездротових мережах, яка забезпечує оптимізацію якості обслуговування (QoS) шляхом мінімізації кінцевих затримок, втрат пакетів і енергоспоживання за рахунок міжрівневої взаємодії, адаптивного періодичного контролю та використання методів комбінаторної оптимізації (зокрема, табу-пошуку та релаксації Лагранжа). Модель орієнтована на роботу з самоподібним трафіком у реальних умовах завантаження мережі.

Методи забезпечення QoS безпроводових мереж та представлені результати.

Обґрунтувати основний метод забезпечення QoS мережі з міжрівневою взаємодією. Зокрема, у даному розділі використані результати у деяких найбільш важливих напрямках, а саме: моделі забезпечення ефективності мережних служб, методи специфікації трафіку, планування пакетів для безпроводової передачі, контроль прийому викликів у безпроводових мережах та оптимізація характеристик безпроводових каналів.

У роботі [5] розроблений алгоритм розв'язання квадратичної задачі про призначення, заснований на класичній схемі з локальним пошуком для поліпшення отриманих рішень. Для прискорення роботи алгоритму застосована технологія локальної оптимізації з апостеріорною корекцією. Там же даний докладний опис алгоритму та наведені асимптотичні оцінки точності отриманих рішень. Тут викладемо основні кроки алгоритму та відмітимо, що він має циклічний характер:

- визначення параметрів, які оптимізуються; в нашому випадку це число мережних вузлів, потужності сигналів на входах приймачів фіксованих та мобільних вузлів, смуга пропускання каналу;
- пробне та поточне рішення – об'єкти спостереження та порівняння поточних результатів;
- кроки пошуку, які характеризують процес генерації пробних рішень стосовно поточного стану пошуку;

Таблиця 1

Числові параметри моделі № I

Максимальний об'єм буферної пам'яті, N_{cells} , чарунок	64
Тривалість інтервалу доступності, мкс	32
Тривалість захисного інтервалу t_{safe} після відправлення підтвердження ACK, мкс	16
Тривалість захисного інтервалу t_{safe2} після успішної передачі пакету, мкс	32
Тривалість захисного інтервалу t_{safe3} після невдалої спроби передачі пакету, мкс	128
Довжина заголовку пакету t_{head} , мкс	80
Швидкість передачі V_{tr} , Мбіт/с	8
Довжина службового кадру опитування t_{RTS} , мкс	72
Довжина службового кадру підтвердження t_{CTS} , мкс	48
Мінімальний розмір вікна конкуренції W_{min} , одиничних інтервалів	16
Максимальний розмір вікна конкуренції W_{max} , одиничних інтервалів	512
Число спроб передачі m	5

Таблиця 2

Числові параметри моделі № II

Максимальний об'єм буферної пам'яті, N_{cells} , чарунок	128
Тривалість інтервалу доступності, мкс	32
Тривалість захисного інтервалу t_{safe} після відправлення підтвердження ACK, мкс	16
Тривалість захисного інтервалу t_{safe2} після успішної передачі пакету, мкс	48
Тривалість захисного інтервалу t_{safe3} після невдалої спроби передачі пакету, мкс	192
Довжина заголовку пакету t_{head} , мкс	80
Швидкість передачі V_{tr} , Мбіт/с	16
Довжина службового кадру опитування t_{RTS} , мкс	72
Довжина службового кадру підтвердження t_{CTS} , мкс	48
Мінімальний розмір вікна конкуренції W_{min} , одиничних інтервалів	32
Максимальний розмір вікна конкуренції W_{max} , одиничних інтервалів	768
Число спроб передачі m	10

– набір можливих напрямів наступного кроку пошуку, тобто набір пробних рішень, пов'язаних з поточним рішенням (щодо цієї проблеми, деякі аргументи є неперервними, а багато тестових рішень можуть прагнути до нескінченності; для практичного застосування алгоритму вони працюють на підмножині з обмеженим числом тестових рішень);

– заборони на деякі (можливо, не перспективні або взагалі хибні) кроки пошуку; заборонені напрями кроків запам'ятовуються та надалі не задіюються;

– критерій подолання – правило ігнорування заборони, якщо, у відповідності до результатів поточного випробування, заборонені кроки приводять до рішення з кращою цільовою функцією ніж рекомендовані кроки – заборонений крок усе ж таки робиться; така

поведінка може підвищувати ризик хибного рішення на поточному кроці, але дає кращу гнучкість процедури в цілому;

– критерій зупинення – умова, при якій процес пошуку завершується; це може бути вичерпання дозволеного числа ітерацій після останньої зміни найкращого рішення або взагалі повне вичерпання максимальної дозволеної кількості ітерацій. Для оцінювання потенціальних характеристик безпроводової телекомунікаційної мережі зі змінними параметрами та структурою, працюючої в умовах зовнішніх завад, розроблено імітаційну модель, числові параметри якої наведені у табл. 1 та 2.

На рис. 1.1 зображені вибірки процесів зміни короточасної інтенсивності пакетів, що поступають з різних вузлів мережі. Змодельовано короточасні сплески інтенсивності (вузол 3) при порівняльно низькій інтенсивності сумарного трафіку вузлів 1 та 2. Така поведінка трафіку вузла 3 свідчить про високий степінь самоподібності трафіку (у наведеному прикладі параметр Херста $H \geq 0,8$) і різних відносних інтенсивностях трафіку α : $\alpha = \lambda/\mu$, де λ – інтенсивність потоку вхідних пакетів, μ – інтенсивність обслуговування.

Для запобігання перевантаження мережі необхідно здійснювати управління розподілом її ресурсів між вузлами та обмеження активності деяких вузлів, що показано на рис. 1 (на інтервалі появи сплеску інтенсивності трафіку від вузла 3 тимчасово обмежено активність вузлів 2 та 3).

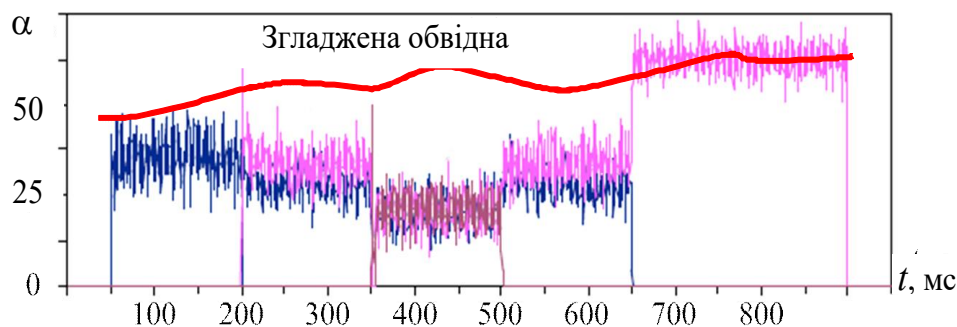


Рис. 1 Вибірki процесів зміни короточасної інтенсивності пакетів, що поступають з різних вузлів мережі; – вузол 1, – вузол 2, – вузол 3.

На інтервалі появи сплеску інтенсивності трафіку від вузла 3 тимчасово обмежено активність вузлів 2 та 3

При керуванні затримками передачі τ_{difs} , тобто з адаптацією до числа вузлів мережі, інтенсивності трафіку, числа втрат та спроб повторної передачі метод періодичного або хоча б майже періодичного контролю дає помітний вииграш у зменшенні затримки, варіацій затримки (джиттеру) та підтриманні пропускну́ї спроможності[4,5,6]. На рис 1.2 наведені результати моделювання мережі, що працює за протоколом *IEEE 802.11 CSMA/CA* та мережі з впорядкованим опитуванням вузлів.

Трафік даних генерувався відомим методом *FSNDP* – *fractal-shot-noise-driven Poisson process*. Фрактальний дробовий процес, званий також процесом *FSNDP*, відноситься до класу двічі стохастичних пуасонівських процесів. Змінна в часі інтенсивність цього процесу задається безперервним випадковим процесом – фрактальним дробовим шумом, який отримується шляхом фільтрації класичного пуасонівського процесу.

При аналізі затримок використовувалася модель безпроводової мережі, до складу якої входило 10 термінальних вузлів. Середня інтенсивність трафіку – 1 Мбіт/с. Число спроб повторних передач $m = 5$.

З графіків, зображених на рис. 2, видно, що при зростанні інтенсивності мережного трафіку, починаючи з певного значення коефіцієнту використання мережі (відношення поточної інтенсивності трафіку до максимальної пропускної спроможності) число колізій, втрат пакетів та повторних передач лавиноподібно зростає. Втрачені пакети передаються повторно, додатково завантажуючи мережу, яка практично починає працювати "на себе", будучи вимушеною обробляти, окрім повторно переданих пакетів, ще й додаткову (сигнальну та управляючу) інформацію.

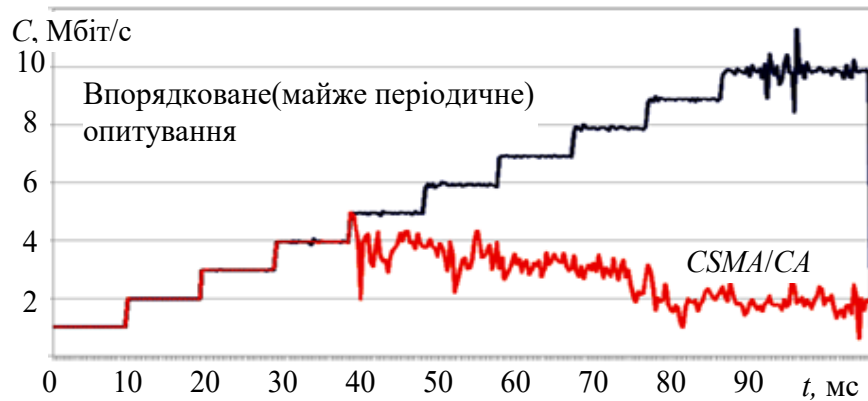


Рис. 2 Підтримка пропускної спроможності мережі при ступінчастому зростанні інтенсивності трафіку

При раптових сплесках інтенсивності, що особливо притаманне самоподібному трафіку, затримка передачі у мережі, що працює за протоколом *CSMA/CA*, зростає скачкоподібно, а спадає після закінчення сплеску інтенсивності досить повільно.

При цьому, завдяки поточному контролю стану мережних вузлів у процесі їх майже періодичного опитування спостерігаються менші виписки затримки передачі. Такі ж результати спостерігаються і стосовно втрат пакетів, варіацій затримки (джиттеру).

Висновки

Нову математичну модель визначення маршруту якості обслуговування (*QoS*), яка дозволяє мережному вузлу визначити оптимальний шлях для мінімізації використання ресурсів при дотриманні необхідних обмежень *QoS*. Запропонована математична модель використовує методику програмування змішаних цілих чисел на релаксації Лагранжа для визначення критичних параметрів та відповідних цільових функцій для управління процесом виявлення маршрутів з обмеженням *QoS*. Компромісні механізми узгодження потреб *QoS* та забезпечення енергоефективності були змодельовані на основі системного підходу. Запропонований підхід суттєво покращує термін експлуатації мережі, зменшуючи при цьому енергоспоживання та середні кінцеві затримки мережі завдяки поточній оптимізації розподілу ресурсів у проміжних вузлах порівняно з існуючими алгоритмами маршрутизації. Для розв'язання задачі комбінаторної оптимізації, зокрема, квадратичних задач розміщення (або квадратичних задач призначення) приходиться застосовувати наближені методи, зокрема, евристичні та метоевристичні методи. Одним з них є метод табу-пошуку. Метод досить легко алгоритмізується та програмується.

Алгоритми табу-пошуку при своїй відносній простоті є досить ефективними для вирішення завдань маршрутизації. Модифікації алгоритму з урахуванням специфіки предметної області дозволяють підвищити ефективність пошуку точок розміщення мережних вузлів шляхом згладжування цільової функції та "обходу" локальних екстремумів. У даному розділі розроблений метод контролю якості обслуговування при організації сеансів обміну даними на базі системи періодичного контролю зі зворотним зв'язком, перерозподілом ресурсів мережних та комутаційних вузлів та відкиданням повідомлень, що можуть

передаватися повторно багато разів, внаслідок чого на мережу лягає додаткове навантаження. Для оцінювання потенціальних характеристик безпроводової телекомунікаційної мережі з випадковим множинним доступом, змінними параметрами та структурою, працюючої в умовах зовнішніх завад, розроблено імітаційну модель мережі. З використанням розробленої моделі оцінені потенціальні характеристики мережі за умов зміни структури (числа термінальних вузлів, поступових та раптових змін характеристик мережного трафіку тощо).

Перелік посилань

1. Dordal P. An Introduction to Computer Networks - Release 1.9.18, 2019. 882p.
2. Vegesna S.R. IP Quality of Service. - Pearson Education, Cisco Press, 2019, 221 River Street, Hoboken, NJ 07030. 368 pp.
3. Recommendation E.800 : Definitions of terms related to quality of service Approved in 2008-09-23, Status : In force. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I>.
4. Ahmed Arshed Al-Shammari, Volodymyr Drovovozov, Oksana Ilkova, and Heorhii Krvykhovetskyi. Optimization and Analysis of Wireless Network Characteristics with Service Quality Maintaining. CMiGIN 2022: 2nd International Conference on Conflict Management in Global Information Networks, November 30, 2022, Kyiv, Ukraine.
5. Дрововозов В.І., Аль-Шаммарі Ахмед Аршед, Толстікова О.В. Оптимізація ключових характеристик безпроводових мереж з міжрівневою взаємодією. Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. праць. К. НАУ, 2021. Вип. №67 (3). С. 16–27.
6. Дрововозов В. І., Аль-Шаммарі Ахмед Аршед, Толстікова О. В., Водоп'янов С. В., Коцюр А. Б. Наскрізна якість сервісу безпроводових мереж з міжрівневою взаємодією. Проблеми інформатизації та управління. 2020. Вип. 63. С. 11–17.
7. Khan M. A., Al-Fuqaha A. QoS-Aware Routing in 5G and Beyond Wireless Networks: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23, no. 3. P. 1568–1617. DOI: 10.1109/COMST.2021.3074456 .
8. Wang Y., Chen X., Liu Z., Tao M. A Deep Reinforcement Learning Approach for QoS Routing in Dynamic Wireless Networks // IEEE Transactions on Network Science and Engineering. 2023. Vol. 10, no. 4. P. 2105–2119. DOI: 10.1109/TNSE.2023.3267891 .
9. Kumar S., Kumar R., Singh S. K. Energy-Efficient QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Using Multi-Objective Optimization // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 15. Art. 4231. P. 1–25. DOI: 10.3390/s20154231 .
10. Li J., Shen H., Yang Y. Delay-Constrained Routing in Wireless Mesh Networks Using Lagrangian Relaxation // Computer Networks. 2022. Vol. 215. Art. 109123. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.comnet.2022.109123 .
11. Zhang L., Wang K., Zhang N., Shen X. Self-Similar Traffic Modeling and QoS Provisioning in Next-Generation Wireless Networks // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 72856–72870. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3078945 .
12. Al-Sayed M. A., El-Bakary H. M. F. A., Hassan A. A. A Tabu Search-Based QoS Routing Algorithm for IoT Networks // Ad Hoc Networks. 2024. Vol. 154. –Art. 103215. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.adhoc.2024.103215 .
13. Duong T. Q., Nguyen H. H., Le-Ngoc T. Cross-Layer QoS Optimization in Wireless Multimedia Sensor Networks // Journal of Network and Computer Applications. 2020. Vol. 167. Art. 102721. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.jnca.2020.102721 .

Надійшла 01.10.2025

УДК 004.056.55:004.93

DOI: 10.31673/2409-7292.2025.041208

Журавель Ю.І., Мичуда Л.З., Сколздра М.М.

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СЕМАНТИКИ ЗОБРАЖЕНЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТЕГАНОГРАФІЧНИХ МЕТОДІВ

У статті досліджено питання підвищення ефективності стеганографічних систем шляхом аналізу результатів приховування інформації при застосуванні різних алгоритмів вбудовування. Метою роботи є оцінювання впливу методу стеганографічного перетворення на візуальну непомітність контейнера та стійкість прихованих даних до деструктивних впливів. Проведено порівняння класичних алгоритмів LSB-модифікації з частотними методами на основі дискретного косинусного (DCT) та вейвлет-перетворення (DWT), а також з комбінованими підходами, що враховують просторово-частотну структуру зображення. Запропоновано комплекс критеріїв ефективності, який включає об'єктивні показники візуальної якості (PSNR, SSIM, MSE), нормовану середньоквадратичну похибку, а також показники стійкості до атак різного типу. У роботі наведено результати експериментальних досліджень ефективності стеганоалгоритмів із використанням наборів тестових зображень з різним семантичним наповненням. Показано, що структурно-змістові особливості зображення суттєво впливають на ефективність приховування: зображення зі складною текстурою забезпечують вищу ємність і візуальну