

Карнаух Д. М., аспірант Національного університету «Запорізька політехніка»

ORCID: 0009-0008-2087-5222

Тягунова М. Ю., кандидат технічних наук, доцент,
в. о. декана факультету комп'ютерних наук та технологій, доцент
кафедри комп'ютерних систем та мереж
факультету комп'ютерних наук і технологій
Національного університету «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0002-9166-5897

Киричек Г. Г., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж
Національного університету «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0002-0405-7122

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНОЇ АГРЕГАЦІЇ В WI-FI 7 ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЗАТРИМОК ТА ВТРАТ ПАКЕТІВ В ІОТ-СИСТЕМАХ З LIDAR ТА ВІДЕОКАМЕРАМИ

У статті досліджено вплив механізмів частотної агрегації та Multi-Link Operation у бездротових мережах стандарту IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) на показники затримки та втрат пакетів у гетерогенних IoT-системах, що інтегрують відеокамери та LiDAR-сенсори. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням обсягів сенсорних даних у системах розумних міст, автономного транспорту, промислової автоматизації та інтелектуального відеоспостереження, для яких критичними є стабільність доставки інформації, мінімізація граничних затримок і збереження часової узгодженості багатоканальних потоків.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та прикладний аналіз ефективності багатолінкових механізмів Wi-Fi 7 щодо зниження латентності та коефіцієнта втрат пакетів у сценаріях із поєднанням відео- та LiDAR-трафіку, а також розроблення адаптивної моделі розподілу потоків між частотними лінками з урахуванням вимог різних класів даних. Об'єктом дослідження є процеси передавання гетерогенного сенсорного трафіку в багаточастотних бездротових мережах, а предметом – закономірності впливу частотної агрегації та Multi-Link Operation на показники якості обслуговування IoT-систем реального часу.

Методологічну основу дослідження становлять методи теорії масового обслуговування, багатокритеріальної оптимізації, стохастичного аналізу бездротових мереж та системного моделювання. У роботі запропоновано модель адаптивного вибору лінки, яка базується на оцінюванні прогнозованої затримки, імовірності втрат і рівня завантаженості каналу та реалізується у вигляді зваженого критерію прийняття рішень. Вагові коефіцієнти моделі налаштовуються відповідно до пріоритетів відео- та LiDAR-трафіку, що забезпечує баланс між часовою стабільністю, надійністю та ефективним використанням радіоресурсу.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що застосування Multi-Link Operation дозволяє суттєво зменшити середню та граничну затримку передачі даних за рахунок розподілу навантаження між кількома частково незалежними середовищами доступу, зниження частоти повторних передач і скорочення часу зайняття ефіру. Показано, що найбільший виграв досягається у високонавантажених сценаріях із великою кількістю клієнтів, де одночастотні мережі характеризуються флуктуаціями QoS. Запропонована модель маршрутизації пакетів забезпечує зменшення tail-latency та коефіцієнта втрат, що є критично важливим для підтримання синхронізації сенсорних даних і стабільності відеопотоків.

Наукова новизна роботи полягає у формалізації адаптивної моделі розподілу трафіку між багаточастотними лінками Wi-Fi 7 з урахуванням специфіки гетерогенного сенсорного навантаження та у встановленні кількісних залежностей між параметрами багатолінкової архітектури й показниками якості обслуговування. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх використання під час проєктування та оптимізації бездротових інфраструктур для систем відеоспостереження, автономної навігації, промислового Інтернету речей і комплексів сенсорного злиття даних, що функціонують у режимі реального часу.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням інтелектуальних алгоритмів керування Multi-Link Operation на основі методів машинного навчання, інтеграцією багатолінкових механізмів із технологіями периферійних



обчислень та мобільними мережами наступних поколінь, а також з експериментальною верифікацією запропонованих підходів у масштабних багатосотових середовищах із реальним сенсорним навантаженням.

Ключові слова: Wi-Fi 7, IEEE 802.11be, частотна агрегація, Multi-Link Operation, затримка, втрата пакетів, IoT, LiDAR, відеопотоки, QoS.

Karnaukh D. M., Tiahunova M. Yu., Kyrychek H. H. Methods for optimizing the use of frequency aggregation in Wi-Fi 7 to minimize latency and packet loss in IoT systems with LiDAR and video cameras

The article investigates the influence of frequency aggregation mechanisms and Multi-Link Operation in wireless networks of the IEEE 802.11be standard (Wi-Fi 7) on the delay and packet loss indicators in heterogeneous IoT systems that integrate video cameras and LiDAR sensors. The relevance of the study is due to the rapid growth of sensor data volumes in smart city systems, autonomous transport, industrial automation and intelligent video surveillance, for which the stability of information delivery, minimization of marginal delays and preservation of time consistency of multi-channel streams are critical.

The aim of the work is to provide theoretical justification and applied analysis of the effectiveness of Wi-Fi 7 multi-link mechanisms in reducing latency and packet loss in scenarios with a combination of video and LiDAR traffic, as well as to develop an adaptive model for distributing flows between frequency links taking into account the requirements of different data classes. The object of the study is the processes of transmitting heterogeneous sensor traffic in multi-frequency wireless networks, and the subject is the regularities of the influence of frequency aggregation and Multi-Link Operation on the quality of service indicators of real-time IoT systems.

The methodological basis of the study is the methods of queuing theory, multi-criteria optimization, stochastic analysis of wireless networks and system modeling. A model for adaptive link selection, which is based on the assessment of the predicted delay, probability of loss and the level of channel congestion and is implemented in the form of a weighted decision-making criterion, is proposed. The model weights are adjusted according to the priorities of video and LiDAR traffic, achieving a balance between time stability, reliability and efficient use of the radio resource.

The analysis shows that the use of Multi-Link Operation allows to significantly reduce the average and marginal data transmission delay by distributing the load between several partially independent access environments, reducing the frequency of retransmissions and the time of air occupation. It is shown that the greatest gain is achieved in high-load scenarios with a large number of clients, where single-frequency networks are characterized by QoS fluctuations. The proposed packet routing model provides a reduction in tail-latency and loss coefficient, which is critically important for maintaining sensor data synchronization and video stream stability.

The scientific novelty of the work lies in the formalization of an adaptive model of traffic distribution between multi-frequency Wi-Fi 7 links, taking into account the specifics of heterogeneous sensor load and in establishing quantitative dependencies between multi-link architecture parameters and quality of service indicators. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their use in the design and optimization of wireless infrastructures for video surveillance systems, autonomous navigation, industrial Internet of Things, and sensor data fusion complexes operating in real time.

Prospects for further research are related to the development of intelligent Multi-Link Operation control algorithms based on machine learning methods, the integration of multi-link mechanisms with edge computing technologies and next-generation mobile networks, as well as experimental verification of the proposed approaches in large-scale multi-cell environments with real sensor load.

Key words: Wi-Fi 7, IEEE 802.11be, frequency aggregation, Multi-Link Operation, latency, packet loss, IoT, LiDAR, video streams, QoS.

Постановка проблеми. Стрімка цифровізація промислових, транспортних і міських інфраструктур зумовлює зростання ролі бездротових мереж у забезпеченні надійної та низьколатентної передачі даних від сенсорних підсистем реального часу. Особливе місце серед таких підсистем займають IoT-комплекси, що поєднують відеокамери високої роздільної здатності та LiDAR-сенсори, які формують великі обсяги гетерогенного трафіку з підвищеними вимогами до затримки, джитера та втрат пакетів. У сценаріях автономної навігації, відеоаналітики, систем комп'ютерного зору та багатосенсорного злиття даних (sensor fusion) навіть короточасні зростання затримки або часткові втрати пакетів можуть призвести до деградації якості розпізнавання об'єктів, втрати синхронізації часових міток або порушення алгоритмів керування.

Сучасні бездротові мережі стандарту IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) орієнтовані на забезпечення надвисокої пропускної здатності, зменшення латентності та підвищення спектральної ефективності. Однією з ключових інновацій цього стандарту є механізм Multi-Link Operation (MLO), що дозволяє одному пристрою одночасно використовувати декілька частотних лінків (2,4; 5; 6 ГГц) для агрегації ресурсу або динамічного вибору оптимального каналу передачі. Частотна агрегація створює передумови для паралельної передачі потоків різних класів, зменшення впливу перевантажень або інтерференції на якість сервісу.

У контексті IoT-систем із LiDAR та відеокамерами це набуває особливої актуальності. Відеопотоки характеризуються високим середнім бітрейтом та варіативністю трафіку, тоді як LiDAR формує пакетні burst-передачі з жорсткими вимогами до часової узгодженості. Спільне функціонування таких потоків у межах одного радіодомену без належної координації призводить до конкуренції за ефірний ресурс, зростання backoff-затримок на рівні MAC, збільшення кількості повторних передач і підвищення packet loss та tail-latency.

Отже, впровадження механізмів частотної агрегації у Wi-Fi 7 потребує комплексного наукового аналізу їхнього впливу на показники якості обслуговування саме в умовах гетерогенного сенсорного навантаження, характерного для сучасних IoT-архітектур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нормативну основу дослідження впливу частотної агрегації / Multi-Link Operation у Wi-Fi 7 становить стандарт IEEE 802.11be-2024, у якому формалізовано модифікації PHY/MAC для режимів EHT, роботу в діапазоні 1–7,25 ГГц, а також заявлено цілі покращення worst-case latency та jitter поряд із підвищенням пропускної здатності [1]. Це визначає рамку для розгляду затримок і втрат пакетів у сенсорних IoT-потоках (LiDAR, відео), де критичними є хвости розподілу затримок і стійкість до завад у смугах 5/6 ГГц.

Оглядові роботи високого рівня узагальнюють ключові інструменти Wi-Fi 7 для зменшення затримок: агрегацію каналів до 320 МГц, 4096-QAM, MLO, OFDMA/MU-MIMO, puncturing, а також підкреслюють, що для реального часу вирішальними стають не пікові PHY-швидкості, а керування розподілом трафіку між лінками, конфлікти доступу та інтерференція. Зокрема, у роботі [2] систематизовані «вузькі місця» EHT-мереж і напрями, де потрібні алгоритмічні рішення (політики mapping/scheduling, керування колізіями, координація).

Базову картину стану й напрямів розвитку Wi-Fi 7 доповнюють у роботі [3], де показано, що MLO перетворює WLAN на багатолінкову систему, де вигреш у затримці залежить від асиметрії завантаження лінків і правил доступу; для потоків LiDAR/відео це означає потребу в політиках, що мінімізують імовірність потрапляння пакетів у «зайнятий» лінк.

У прикладному зрізі [4] розглядається MLO як механізм одночасного використання кількох каналів і підкреслено, що ефект для QoS визначається не лише агрегацією спектра, а й координацією MAC-рішень (рознесення черг, правила backoff, стратегія вибору лінка), що пов'язано з IoT-системами, де трафік відео та LiDAR має різні профілі «бурстовості» і толерантності до втрат.

Аналітичний фундамент для оцінювання затримок під несатурованим навантаженням подано у роботі [5], де досліджується розподіл затримки MLO у finite-load режимі та показано, що перехід від single-link до MLO здатен «стримувати» високі перцентили затримки, але приріст від додаткових інтерфейсів має спадну віддачу. Для LiDAR/відео це важливо, бо саме 95-й/99-й перцентили часто визначають якість сприйняття/стабільність трекінгу.

Експериментальна сторона проблеми деталізується у роботі про можливості MLO [6]: демонструється, що за симетрично завантажених лінках MLO може зменшувати затримку на порядок, але за асиметрії зайнятості неправильне «призначення» пакета лінку до backoff здатне погіршувати latency. Це вказує на критичність політик traffic-to-link mapping для потоків LiDAR/відео, де помилки можуть породжувати втрати через прострочення або переповнення буферів.

Модельовання сервісу вимогливих мультимедійних застосунків у Wi-Fi 7 виконано у роботі [7], показано перевагу MLO над single-link для низьких затримок і більшої кількості користувачів, але також зазначаючи, що деякі політики розподілу трафіку між лінками можуть деградувати через channel blocking. Це методично близько до задачі LiDAR/відео-IoT, де блокування/інтерференція спричиняють джитер і «дірки» у потоці.

Окремий напрям – «детермінізація» доступу для реального часу через механізми TWT. У роботі [8] досліджують restricted TWT (R-TWT) у Wi-Fi 7 і пропонують модель для оцінки розподілу затримки та імовірності втрат при виділених service periods, що важливо для гарантування затримок у кілька мілісекунд. Для LiDAR/відео це дає інструментарій планування «вікон» передачі для критичних кадрів/пакетів.

Проблеми адаптивного керування ресурсами мережі на «краю» відображає робота [9], де описано платформу для адаптивного розподілу каналів і балансування навантаження у Wi-Fi 7. Для систем із камерами й LiDAR це релевантно як підхід до локального контролю (без хмари) та швидкої перебудови під інтерференцію, перевантаження.

Спроби поєднати оптимізацію MLO з методами навчання продемонстрована у роботі [10], де розглянуто динамічне виділення каналів (у т.ч. з елементами контекстного прийняття рішень), що є перспективним для IoT-кластерів із мінливими профілями навантаження (наприклад, різна інтенсивність відео вдень/вночі та події «сплески» LiDAR).

Для щільних розгортань (типових для «багато камер + LiDAR у зоні») ключовою стає координація між точками доступу. У роботі [11] пропонується підхід до multi-AP cooperation для уникнення ко-канальної інтерференції та спільного розподілу ресурсів, що напряму впливає на втрати пакетів і пікові затримки у завантажених WLAN-сценаріях.

На рівні внутрішніх механізмів ефективності передачі важливою є агрегація кадрів/пакетів. У роботі [12] показано, що неправильна агрегація може створювати «дефіцит пакетів» на інших лінках і зменшувати сумарний вигреш; запропонований алгоритм добору пакетів для агрегації підтверджує значний приріст пропускної здатності в моделюванні. Для LiDAR/відео це також впливає на затримку, бо надмірна агрегація збільшує serialization delay і джитер, а недостатня – знижує ефективність каналу.

Нарешті, модельні роботи щодо правил синхронного доступу MLO доповнюють розуміння компромісів «пропускна здатність ↔ затримка». У роботі [13] аналізується synchronous multi-link access (варіанти

backoff-вибору) й оптимізацію сумарної швидкості, що є методичною базою для подальшого накладання QoS-обмежень, характерних для потоків LiDAR/відеокамер.

Мета статті. Метою роботи є теоретичне та експериментальне дослідження впливу механізмів частотної агрегації та Multi-Link Operation у мережах стандарту IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) на мінімізацію затримок і втрат пакетів у гетерогенних IoT-системах, що інтегрують LiDAR-сенсори та відеокамери, а також розроблення методичних рекомендацій щодо оптимального розподілу трафіку між багаточастотними лінками з урахуванням вимог реального часу.

Виклад основного матеріалу. У стандарті IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) поняття частотної агрегації безпосередньо пов'язане з механізмом Multi-Link Operation (MLO), який дозволяє одному багатолінковому пристрою (Multi-Link Device, MLD) одночасно використовувати декілька радіоінтерфейсів або логічних лінків у різних частотних діапазонах (2,4; 5; 6 ГГц). На відміну від традиційної одночастотної архітектури WLAN, де весь трафік обслуговується одним каналом доступу до середовища, у Wi-Fi 7 формується багатовимірний ресурс передачі, що дає змогу гнучко розподіляти навантаження між кількома незалежними або частково незалежними радіолінками.

Під частотною агрегацією доцільно розуміти паралельне використання кількох частотних каналів у межах MLO для досягнення взаємопов'язаних цілей:

- 1) збільшення сумарної доступної смуги (link aggregation),
- 2) оперативного вибору лінка з мінімальною затримкою або найменшою завантаженістю (link steering),
- 3) підвищення надійності через лінкову надлишковість.

У практичних реалізаціях MLO може працювати в режимі одночасної передачі по кількох лінках (simultaneous transmit/receive) або в режимі швидкого перемикавання/вибору оптимального лінка залежно від стану ефіру.

З позиції теорії масового обслуговування бездротовий канал можна розглядати як систему з обмеженою пропускну здатністю та стохастичним процесом обслуговування пакетів. У одночастотній мережі з інтенсивністю надходження пакетів λ та швидкістю обслуговування μ середня затримка в черзі зростає нелінійно при наближенні λ до μ . Додавання другого або третього лінка ефективно збільшує сумарну пропускну здатність до μ_{tot} (формула 1), що зменшує коефіцієнт завантаження ρ і, відповідно, середню та граничну затримку.

$$\mu_{tot} = \mu_1 + \mu_2(+\mu_3) \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu_{tot}}. \quad (2)$$

Таким чином, навіть без зміни алгоритмів доступу до середовища сам факт розширення доступної смуги зменшує ймовірність накопичення черг і перевищення буферних лімітів, що безпосередньо впливає на зниження втрати пакетів (packet loss), пов'язаного з переповненням черг.

Більш суттєвим для мінімізації латентності є механізм динамічного вибору лінка. У реальному радіосередовищі затримка формується не лише середньою інтенсивністю трафіку, а й короточасними піками навантаження, коливаннями інтерференції, ефектами прихованих вузлів і випадковими backoff-періодами на рівні MAC.

Нехай $D_i(t)$ – оцінка поточної затримки на лінку i , що включає час очікування в черзі, backoff-затримку та час передачі PHY-кадру. Тоді вибір лінка за критерієм згідно формули 3 дозволяє спрямовувати затримкочутливі пакети (наприклад, LiDAR, або керувальні) до найменш завантаженого ресурсу.

$$i^*(t) = \arg \min_i D_i(t). \quad (3)$$

Це знижує ймовірність того, що пакет потрапить у період пікового завантаження конкретного каналу.

Ключовий ефект полягає в зменшенні дисперсії затримки та «вирівнюванні» хвостів її розподілу (tail-latency). У багатолінковій системі ймовірність одночасного перевантаження всіх лінків значно менша, ніж перевантаження одного каналу, що статистично зменшує 95-й та 99-й перцентилі затримки.

Третій аспект – підвищення надійності через надлишковість. Якщо один лінк зазнає зростання рівня завад або тимчасового погіршення співвідношення сигнал/шум, MLD може перенаправити трафік на інший канал. Це зменшує частоту повторних передач, які є значним джерелом додаткової затримки.

Таким чином, лінкова надлишковість у MLO працює як механізм адаптивної маршрутизації на рівні MAC/PHY.

У системах із відеокамерами та LiDAR спостерігається поєднання довготривалих потоків високого бітрейту та коротких burst-передач. Частотна агрегація дозволяє рознести ці класи трафіку між різними лінками або навіть здійснювати паралельну передачу, що:

- зменшує взаємний вплив пікових навантажень;
- знижує ймовірність чергових блокувань;

- стабілізує джитер відеопотоків;
- мінімізує затримку службових LiDAR-пакетів.

Поєднання MLO з розширеними PHY-можливостями створює багатомірний ресурс доступу до середовища, який за умови правильного алгоритмічного керування дозволяє підвищити стабільність і передбачуваність передачі даних у високонавантажених IoT-системах реального часу.

Гетерогенні IoT-системи, що поєднують відеокамери та LiDAR-сенсори, формують складний за структурою інформаційний потік, характеристики якого істотно відрізняються за часовою динамікою, обсягом даних, що передаються та вимогами до якості обслуговування. Відеокамери генерують квазістаціонарні потоки зі змінним бітрейтом, зумовленим особливостями міжкадрового прогнозування та адаптивного кодування. Такі потоки характеризуються відносно стабільною середньою інтенсивністю, однак містять значні короточасні флуктуації, пов'язані з появою ключових кадрів, зміною сцени або зростанням деталізації зображення. Унаслідок цього відеотрафік є високочутливим до джитера та варіацій затримки, оскільки нерівномірність надходження пакетів безпосередньо впливає на роботу буферів декодера і може призводити до накопичення затримки або втрати синхронізації між кадрами. Особливо критичною для якості сприйняття відео є гранична затримка, або tail-latency, перевищення якої спричиняє ефекти «заморожування» зображення, пропуск кадрів і порушення безперервності відеопотоку.

На відміну від відеокамер, LiDAR-сенсори формують трафік із вираженою імпульсною структурою, що проявляється у вигляді пакетних «порцій» просторових точок, які передаються після завершення циклу сканування або накопичення вимірювань. Такий burst-трафік супроводжується різкими зростаннями інтенсивності передачі протягом коротких інтервалів часу та відносно низькою активністю між ними. Крім того, LiDAR-системи часто генерують службові пакети керування, синхронізації та часових міток, які мають невеликий обсяг, але жорсткі часові обмеження. Порушення дедлайнів доставки таких повідомлень призводить до втрати часової узгодженості сенсорних даних, зниження точності просторової реконструкції та деградації алгоритмів сенсорного злиття.

В умовах одночастотної бездротової мережі обидва класи трафіку змушені використовувати спільний канал доступу до середовища передачі, що реалізується за стохастичними алгоритмами конкуренції на основі механізмів CSMA/CA та випадкового backoff. За наявності burst-передач LiDAR у мережі різко зростає кількість кадрів, які одночасно претендують на доступ до ефіру, що спричиняє збільшення середнього часу очікування в backoff-стані, формування черг на передавальному боці та зростання ймовірності колізій. У цей період відеопотоки зазнають затримок, що накопичуються в буферах, і проявляються у вигляді нестабільного відтворення та підвищеного джитера.

З іншого боку, у випадку інтенсивної відеотрансляції з високим бітрейтом канал тривалий час перебуває у стані високого завантаження, що зменшує доступний ресурс для LiDAR-пакетів. У таких умовах затримочутливі сенсорні повідомлення можуть потрапляти у переповнені буфери або багаторазово відкладатися через механізм повторних передач, що призводить до перевищення допустимих часових інтервалів доставки. Як наслідок, частина пакетів втрачається через буферні перевантаження або скидається на прикладному рівні як застаріла інформація.

Стохастичний характер доступу до середовища у поєднанні з різною часовою структурою відео- та LiDAR-трафіку зумовлює нелінійне зростання затримок і нестабільність показників якості обслуговування при збільшенні навантаження. Навіть за відносно помірної середньої інтенсивності передавання короточасні піки активності можуть призводити до формування «хвостів» розподілу затримки, що істотно перевищують середні значення. Це проявляється у зростанні 95-го та 99-го перцентилів затримки, які є критичними для систем реального часу та задач просторової орієнтації.

Унаслідок зазначених процесів у одночастотних мережах спостерігається комплексна деградація параметрів QoS, що охоплює підвищення середньої затримки та джитера, збільшення граничної затримки, зростання коефіцієнта втрат пакетів і частки повторних передач. Сукупний вплив цих факторів призводить до зниження стабільності відеопотоків, порушення часової узгодженості LiDAR-даних і погіршення загальної ефективності функціонування сенсорної IoT-системи. Саме ці обмеження одночастотних архітектур зумовлюють необхідність застосування багатолінкових і багаточастотних механізмів, здатних розподіляти гетерогенне навантаження та мінімізувати взаємний вплив різних класів трафіку.

У багатолінкових мережах стандарту IEEE 802.11be ефективність мінімізації затримок і втрат пакетів істотно залежить від алгоритмів розподілу трафіку між доступними частотними лінками. Розглянемо MLO-клієнт, який одночасно використовує два радіолінки, наприклад у діапазонах 5ГГц (L_1) та 6ГГц (L_2). Для кожного лінки в момент часу t формується вектор стану, що характеризує поточну якість обслуговування і включає прогнозовану затримку $\hat{D}_i(t)$, оцінку ймовірності втрат або помилок передачі $\hat{P}_i(t)$ та рівень завантаженості ефіру $\hat{U}_i(t)$. Прогнозована затримка інтегрує час очікування в передавальній черзі, середній інтервал випадкового доступу (backoff) та тривалість фізичної передачі кадру на рівні PHY. Ймовірність втрати або помилки відображає сумарний вплив інтерференції, рівня шуму, повторних передач і буферних перевантажень, тоді як завантаженість каналу характеризує частку часу, протягом якої середовище перебуває у стані зайнятості.

За наявності таких оцінок задача маршрутизації пакетів між лінками може бути формалізована як задача багатокритеріальної оптимізації, орієнтованої на мінімізацію інтегральної метрики якості для кожного класу трафіку. Для пакета класу c (відео або LiDAR) оптимальний лінк у момент часу t визначається за правилом 4, де коефіцієнти $w_D^{(c)}$, $w_P^{(c)}$, $w_U^{(c)}$ відображають відносну важливість відповідних параметрів для конкретного класу трафіку. Така форма критерію дозволяє інтегрувати часові, надійнісні та ресурсні характеристики каналу в єдину функцію прийняття рішень, що є особливо важливим у гетерогенних IoT-системах.

$$i^*(t, c) = \arg \min_i \left(w_D^{(c)} \hat{D}_i(t) + w_P^{(c)} \hat{P}_i(t) + w_U^{(c)} \hat{U}_i(t) \right). \quad (4)$$

Для LiDAR-трафіку, який характеризується жорсткими часовими обмеженнями та високими вимогами до достовірності даних, доцільним є підвищення вагових коефіцієнтів $w_D^{(c)}$ та $w_P^{(c)}$, що забезпечує пріоритет мінімальної затримки та низької ймовірності втрат. У цьому випадку алгоритм схильний спрямовувати пакети на лінк із найменшою чергою та кращими радіоумовами навіть за помірного рівня завантаженості. Для відеотрафіку, чутливого насамперед до джитера та нестабільності пропускну здатності, доцільним є збалансування коефіцієнтів $w_D^{(c)}$ та $w_U^{(c)}$, що дозволяє уникати перевантажених каналів і зменшувати варіативність затримки, пов'язану з коливаннями доступності ефіру. Такий підхід узгоджується з концепцією MLO як механізму швидкого вибору найкращого шляху для затримкочутливих і ресурсомістких потоків.

Моделювання виконувалося для сценарію IoT-мережі з гетерогенним трафіком, що включав відеопотоки (кадри розміром 600 кБ із частотою 25 кадрів/с) та LiDAR-дані (пакети розміром 150 кБ із частотою 10 Гц). У системі передбачалося одночасне функціонування 8 відеокамер і 4 LiDAR-сенсорів. Оцінювання здійснювалося для трьох режимів передачі: одночастотного доступу в діапазонах 5 ГГц та 6 ГГц і багатолінкової архітектури Multi-Link Operation. Для кожного лінка враховувалися стохастичні параметри завантаженості каналу, затримки доступу до середовища та ймовірності помилок передачі. У якості критеріїв ефективності використовувалися середня затримка, 95-й перцентиль затримки, коефіцієнт втрат пакетів і частка повторних передач.

У процесі імітаційного оцінювання було досліджено вплив використання Multi-Link Operation на показники якості обслуговування у сценарії з одночасною передачею відео- та LiDAR-трафіку. Порівняння здійснювалося для трьох базових варіантів організації доступу до середовища: одночастотної передачі в діапазонах 5 та 6 ГГц, багатолінкової передачі без адаптивного розподілу трафіку та багатолінкової передачі з використанням запропонованої моделі вибору лінка. Результати дослідження наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна оцінка показників QoS для одночастотної та MLO-архітектури

Архітектура передачі	Середня затримка, мс	95 % затримка (tail), мс	Втрати пакетів (PLR), %	Частка повторних передач, %
Single Link (5 ГГц)	38.6	112.4	3.8	9.7
Single Link (6 ГГц)	31.2	96.3	2.9	7.4
MLO (без адаптації)	24.8	71.6	1.9	5.2
MLO (адаптивний розподіл)	17.3	48.5	0.9	2.6

Джерело: розроблено автором на основі імітаційного моделювання

Отримані результати свідчать, що перехід від одночастотної архітектури до MLO забезпечує зниження як середньої затримки, так і її граничних значень. Зокрема, використання двох лінків без адаптації дозволяє зменшити середню затримку на 20–30 %, тоді як застосування адаптивного розподілу трафіку забезпечує додаткове зниження до понад 50 % порівняно з одночастотним режимом. Найбільш суттєві покращення спостерігаються у показниках tail-latency, що є критичними для задач синхронізації сенсорних даних.

Також зафіксовано зменшення коефіцієнта втрат пакетів та частки повторних передач, що пояснюється розподілом навантаження між незалежними частотними середовищами та зниженням ймовірності потрапляння пакетів у перевантажений канал. Це підтверджує ефективність використання адаптивної моделі розподілу трафіку для стабілізації передачі гетерогенних потоків у високонавантажених IoT-сценаріях.

Запропонована модель фактично реалізує адаптивну політику керування потоками на рівні MAC/RNHU, у межах якої рішення про вибір лінка приймається з урахуванням поточного стану мережі та характеристик трафіку. Важливою особливістю є можливість оперативного реагування на короточасні піки навантаження та локальні збурення радіосередовища, що дозволяє зменшувати накопичення черг і запобігати каскадному зростанню затримок.

З позиції інтерпретації ефекту агрегації на рівні теорії масового обслуговування багатолінкова система може розглядатися як сукупність частково незалежних серверів, що обслуговують спільний потік заявок. Перехід від одного каналу до двох або більше лінків істотно зменшує ймовірність одночасного перебування

всіх каналів у стані перевантаження, що призводить до нелінійного зменшення середнього часу очікування в черзі, особливо в зоні високих коефіцієнтів завантаження. Крім того, розподіл трафіку між кількома середовищами доступу знижує частоту повторних передач, оскільки пакети рідше потрапляють у зони підвищеної інтерференції або конфліктів доступу. Скорочення кількості повторних спроб зменшує додаткові часові накладні витрати і водночас знижує ефективні втрати даних на рівні прикладних сервісів.

Сукупна дія цих факторів формує синергетичний ефект агрегації, за якого багатолінкова архітектура не лише збільшує пропускну здатність, а й істотно покращує часову стабільність передачі. Найбільший вигаш спостерігається у сценаріях із високою щільністю відеокамер та LiDAR-сенсорів, де деградація QoS в одночастотних мережах зумовлена конкуренцією за ефір і значними флуктуаціями навантаження. У таких умовах адаптивний розподіл трафіку на основі зваженого критерію дозволяє мінімізувати як середні, так і граничні затримки, зменшити ймовірність втрат пакетів і забезпечити більш передбачувану роботу сенсорної IoT-інфраструктури в режимі реального часу.

Ефективне використання механізмів частотної агрегації та Multi-Link Operation у мережах стандарту IEEE 802.11be потребує цілеспрямованої адаптації архітектури передавання даних до особливостей гетерогенного сенсорного трафіку. Насамперед доцільно реалізувати принцип функціонального розділення потоків між доступними лінками з урахуванням їхніх поточних характеристик. Затримкочутливі пакети LiDAR та службові повідомлення керування доцільно спрямовувати на лінк із мінімальними прогнозованими значеннями затримки \hat{D}_i та ймовірності втрат \hat{P}_i , що забезпечує дотримання часових дедлайнів і збереження синхронізації сенсорних даних. Відеопотоки, для яких критичною є стабільність доставки та мінімізація джитера, доцільно спрямовувати на лінк із найменшим рівнем завантаженості \hat{U}_i та відносно постійним доступним ресурсом, що знижує ризик різких коливань пропускну здатності.

Важливим елементом забезпечення якості обслуговування є коректне налаштування механізмів пріоритетизації трафіку на основі EDCA/WMM. Службові пакети керування та критичні LiDAR-повідомлення доцільно відносити до найвищих категорій доступу з мінімальними інтервалами очікування та зменшеними параметрами backoff, що забезпечує їм переважний доступ до середовища. Відеотрафік слід розміщувати у класах video або voice залежно від профілю доставки та допустимого рівня компресії, що дозволяє збалансувати вимоги до затримки й пропускну здатності. Такий підхід зменшує взаємний вплив різних класів потоків і підвищує передбачуваність їхньої поведінки в умовах високого навантаження.

У процесі експлуатації мережі доцільно орієнтуватися не лише на середні значення затримки, а й на показники граничної латентності, зокрема 95-й і 99-й перцентилі. Для IoT-систем із LiDAR та відеокамерами саме ці характеристики визначають ймовірність порушення часової узгодженості сенсорних даних і виникнення пропусків у процесах сенсорного злиття. Регулярний моніторинг tail-latency дозволяє своєчасно виявляти приховані перевантаження та деградацію якості сервісу, які можуть залишатися непомітними за аналізу лише середніх показників.

У щільних розгортаннях із великою кількістю клієнтських пристроїв і точок доступу ефективність Multi-Link Operation значною мірою залежить від узгодження локальних політик керування ефіром на рівні мережевої інфраструктури. Доцільним є поєднання MLO з механізмами балансування клієнтів між точками доступу, оптимізації потужності передавання, планування каналів і мінімізації ко-канальної інтерференції. Без такої координації багатолінкова архітектура може втрачати частину своїх переваг через взаємні завади та неузгоджене використання спектра в суміжних сотах.

Таким чином, практична реалізація Wi-Fi 7 у сенсорних IoT-системах з LiDAR та відеокамерами повинна ґрунтуватися на комплексному підході, що поєднує адаптивний розподіл трафіку між лінками, пріоритетизацію потоків, контроль граничних затримок і координацію роботи точок доступу. Лише за умови інтеграції цих заходів можливо досягти стійкого зниження затримок і втрат пакетів у високонавантажених середовищах та забезпечити надійне функціонування сенсорних систем реального часу.

Висновки. У роботі здійснено комплексний аналіз впливу механізмів частотної агрегації та Multi-Link Operation у мережах стандарту IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) на показники затримки та втрат пакетів у гетерогенних IoT-системах, що інтегрують LiDAR-сенсори та відеокамери. Показано, що багатолінкова архітектура, заснована на паралельному використанні кількох частотних діапазонів, формує якісно новий рівень керування радіоресурсами, який дозволяє істотно зменшити негативний вплив конкуренції за ефір, локальних піків навантаження та інтерференції на стабільність передачі даних. Установлено, що розподіл трафіку між лінками з урахуванням прогнозованих параметрів затримки, ймовірності втрат і завантаженості каналу забезпечує зниження середніх і граничних значень латентності, скорочення частки повторних передач та підвищення передбачуваності функціонування сенсорних підсистем у режимі реального часу.

Доведено, що найбільший ефект від частотної агрегації проявляється у сценаріях із високою щільністю клієнтських пристроїв і поєднанням різнорідних потоків, де одночастотні мережі характеризуються значними флуктуаціями затримки та підвищеним рівнем втрат пакетів. Запропонована модель зваженого вибору лінка дозволяє адаптивно враховувати вимоги різних класів трафіку, забезпечуючи пріоритетну доставку затримкочутливих LiDAR-даних і стабілізацію відеопотоків. Обґрунтовано, що поєднання MLO

з розширеними можливостями фізичного рівня Wi-Fi 7, зокрема використанням широких каналів, високих порядків модуляції та гнучкого планування ресурсів, формує синергетичний ефект, який сприяє мінімізації airtime-витрат і зменшенню інтенсивності конфліктів доступу.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування багатолінкових механізмів як базового інструменту підвищення якості обслуговування в сенсорних IoT-мережах нового покоління та створюють методичне підґрунтя для проектування бездротових інфраструктур розумних міст, автономних транспортних систем і промислових комплексів, орієнтованих на обробку великих обсягів даних у реальному масштабі часу.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з поглибленим вивченням адаптивних алгоритмів розподілу трафіку на основі методів машинного навчання та прогнозування стану радіосередовища, що дозволить підвищити точність вибору оптимального лінка в умовах динамічної інтерференції та мобільності пристроїв. Актуальним напрямом є розроблення кросрівневих моделей, які інтегрують інформацію з фізичного, каналного та прикладного рівнів для формування єдиної політики керування якістю сервісу. Подальшого розвитку потребують також експериментальні дослідження у великомасштабних багатосотових мережах із реальним сенсорним навантаженням, зокрема з урахуванням енергетичних обмежень пристроїв та вимог до інформаційної безпеки. Важливим завданням є оцінювання взаємодії MLO з технологіями периферійних обчислень і мереж 5G/6G у гібридних архітектурах, що відкриває можливості для формування інтегрованих платформ обробки сенсорних даних із гарантованими часовими характеристиками.

Список використаних джерел:

1. IEEE 802.11be-2024. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems... Part 11... Amendment 2: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT). IEEE Standards Association. Published: 2025-07-22. DOI: 10.1109/IEEESTD.2024.11090080
2. Deng C., Fang X., Han X., Wang X., Yan L., He R., Long Y., Guo Y. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22, No. 4. P. 2136–2166. DOI: 10.1109/COMST.2020.3012715
3. Khorov E., Levitsky I., Akyildiz I. F. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7. *IEEE Access*. 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997336
4. López-Raventós Á., Bellalta B. Multi-Link Operation in IEEE 802.11be WLANs. *IEEE Wireless Communications*. 2022. Vol. 29, No. 4. P. 94–100. DOI: 10.1109/MWC.006.2100404
5. Bellalta B., Carrascosa M., Galati-Giordano L., Geraci G. Delay Analysis of IEEE 802.11be Multi-link Operation under Finite Load. arXiv:2212.12420.2022
6. Carrascosa-Zamacois M., Geraci G., Knightly E., Bellalta B. Wi-Fi Multi-Link Operation: An Experimental Study of Latency and Throughput. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2024. DOI: 10.1109/TNET.2023.3283154
7. Alsakati M., Pettersson C., Max S., Moothedath V. N., Gross J. Performance of 802.11be Wi-Fi 7 with Multi-Link Operation on AR Applications. arXiv:2304.01693.2023
8. Belogaev A., Shen X., Pan C., Jiang X., Blondia C., Famaey J. Dedicated Restricted Target Wake Time for Real-Time Applications in Wi-Fi 7. arXiv:2402.15900.2024
9. Rosani D., Palattella M., Galletti M. та ін. A Fog Platform for Adaptive Channel Allocation and Load Balancing in Wi-Fi 7 Networks. arXiv:2411.12077. 2024
10. Lian Y., Zhang K., Liu Z., Liu X., Guo B., Zhang L. LLM-Augmented Multi-Armed Bandit for Dynamic Channel Allocation in Wi-Fi 7. arXiv:2506.04594. 2025.
11. Shao S., Wang Z., Xu S., Guo S., Qiu X. Multi-AP Cooperative Radio Resource Allocation Method for Co-Channel Interference Avoidance in 802.11be WLAN. *Computers, Materials & Continua*. 2025. Vol. 84, No. 3. P. 4949-4972. DOI: 10.32604/cmc.2025.065053
12. Paroshin V., Levitsky I., Loginov V., Khorov E. Aggregation Algorithm to Increase Throughput of Multi-Link Wi-Fi 7 Devices. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2024. Vol. 13, No. 12. P. 3484–3487. DOI: 10.1109/LWC.2024.3474294
13. Zhang J., Gao Y., Sun X., Zhan W., Guo Z., Liu P. Synchronous Multi-Link Access in IEEE 802.11be: Modeling and Network Sum Rate Optimization. *Proc. IEEE ICC 2022*. 2022. P. 2309-2314. DOI: 10.1109/ICC45855.2022.9838923

References:

1. IEEE 802.11be-2024. IEEE Standard for Information technology -Telecommunications and information exchange between systems... Part 11... Amendment 2: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT). IEEE Standards Association. Published: 2025-07-22. DOI: 10.1109/IEEESTD.2024.11090080
2. Deng, C., Fang, X., Han, X., Wang, X., Yan, L., He, R., Long, Y., Guo, Y. (2020). IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 22, No. 4. P. 2136–2166. DOI: 10.1109/COMST.2020.3012715

-
3. Khorov, E., Levitsky, I., Akyildiz, I. F. (2020). Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7. *IEEE Access*. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997336
 4. López-Raventós, Á., Bellalta, B. (2022). Multi-Link Operation in IEEE 802.11be WLANs. *IEEE Wireless Communications*. Vol. 29, No. 4. P. 94-100. DOI: 10.1109/MWC.006.2100404
 5. Bellalta, B., Carrascosa, M., Galati-Giordano, L., Geraci, G. (2022). Delay Analysis of IEEE 802.11be Multi-link Operation under Finite Load. arXiv:2212.12420
 6. Carrascosa-Zamacois, M., Geraci, G., Knightly, E., Bellalta, B. (2024). Wi-Fi Multi-Link Operation: An Experimental Study of Latency and Throughput. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. DOI: 10.1109/TNET.2023.3283154
 7. Alsakati, M., Pettersson, C., Max, S., Moothedath, V. N., Gross, J. (2023). Performance of 802.11be Wi-Fi 7 with Multi-Link Operation on AR Applications. arXiv:2304.01693.
 8. Belogaev, A., Shen, X., Pan, C., Jiang, X., Blondia, C., Famaey, J. (2024). Dedicated Restricted Target Wake Time for Real-Time Applications in Wi-Fi 7. arXiv:2402.15900.
 9. Rosani, D., Palattella, M., Galletti, M., et al. (2024). A Fog Platform for Adaptive Channel Allocation and Load Balancing in Wi-Fi 7 Networks. arXiv:2411.12077
 10. Lian, Y., Zhang, K., Liu, Z., Liu, X., Guo, B., Zhang, L. (2025). LLM-Augmented Multi-Armed Bandit for Dynamic Channel Allocation in Wi-Fi 7. arXiv:2506.04594
 11. Shao, S., Wang, Z., Xu, S., Guo, S., Qiu, X. (2025). Multi-AP Cooperative Radio Resource Allocation Method for Co-Channel Interference Avoidance in 802.11be WLAN. *Computers, Materials & Continua*. Vol. 84, No. 3. P. 4949–4972. DOI: 10.32604/cmc.2025.065053
 12. Paroshin, V., Levitsky, I., Loginov, V., Khorov, E. (2024). Aggregation Algorithm to Increase Throughput of Multi-Link Wi-Fi 7 Devices. *IEEE Wireless Communications Letters*. Vol. 13, No. 12. P. 3484–3487. DOI: 10.1109/LWC.2024.3474294
 13. Zhang, J., Gao, Y., Sun, X., Zhan, W., Guo, Z., Liu, P. (2022). Synchronous Multi-Link Access in IEEE 802.11be: Modeling and Network Sum Rate Optimization. Proc. IEEE ICC 2022. P. 2309-2314. DOI: 10.1109/ICC45855.2022.9838923

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026