

РЕЦЕНЗІЯ

члена разової спеціалізованої вченої ради,
доктора технічних наук, професора

БЕРКМАН ЛЮБОВ НАУМІВНИ

на дисертаційну роботу Табора Дениса Івановича на тему:

«Методи і модель підвищення ефективності передавання багатоканальним пристроєм в мережах стандарту IEEE 802.11be»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 172 - Телекомунікації та радіотехніка

Актуальність теми

Робота Табора Дениса присвячена актуальній проблемі оскільки сучасні бездротові мережі змінюють профіль навантаження. Якщо раніше головним показником була максимальна пропускна здатність, то тепер фокус змістився на забезпечення гарантовано низької затримки доставки пакетів. Що пов'язано зі зростанням популярності сервісів реального часу.

Рішенням цих вимог є технологія багатоканальної роботи (MLO), яка впроваджується у новому стандарті Wi-Fi 7. Що дозволяє пристрою динамічно перенаправляти трафік на найменш завантажений інтерфейс або дублювати критичні дані відразу на кількох каналах. Але на практиці управління окремими радіоінтерфейсами без їх оптимальної координації не дає очікуваних результатів. Коли кожен канал багатоканального пристрою функціонує окремо, виникає розбалансування передачі. Як наслідок, можна спостерігати ситуації, коли інформаційні пакети довго очікують доступу до середовища в черзі одного інтерфейсу, тоді як інші доступні канали цього ж пристрою простоюють вільними.

Тому розробка методів детермінованого планування ресурсів є актуальною задачею в сучасних умовах.

Обґрунтованість наукових положень

Обґрунтованість рішень, запропонованих у дисертації, базується на глибокому аналізі апаратних обмежень стандарту IEEE 802.11be. Автор не просто теоретизує, а логічно виводить свої висновки з реальних проблем багатоканальної роботи.

Окрім цього, всі створені алгоритми пройшли перевірку і достовірність результатів повністю підтверджується імітаційним моделюванням у середовищі MATLAB.

Під час тестування здобувач провів коректне порівняння свого методу з існуючими базовими стратегіями доступу. Отримані кількісні показники ефективності для трафіку реального часу переконливо доводять дієвість розроблених підходів в умовах середніх та високих навантажень.

Наукова новизна отриманих результатів:

В роботі вирішено задачу управління радіоресурсами в мережах IEEE 802.11be, в межах якої отримано наступні результати:

- *Удосконалено* метод оцінки каналу для багатоканального пристрою стандарту IEEE 802.11be, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на комплексному аналізі стану радіосередовища за рахунок впровадження інтегрованого показника якості та вагових коефіцієнтів, які формалізують поточне завантаження спектру, динаміку завад та вплив пристроїв попередніх поколінь Wi-Fi, що дозволяє проводити оцінку і забезпечити обґрунтований вибір оптимальних частотних конфігурацій і каналів.

- *Вперше розроблено* математичну модель розподілу трафіку для багатоканального пристрою, яка ґрунтується на представленні пристрою як єдиної системи масового обслуговування, де стан середовища та обмеження режимів багатоканальної роботи формалізуються вектором стану і матрицею рішень, а обґрунтування вибору досягається за рахунок встановлення аналітичного зв'язку між цими параметрами керування та очікуваними показниками якості обслуговування, що дозволяє прийняти рішення про доцільність використання політик розподілу трафіку для поточного циклу планування при багатоканальній роботі.

- *Вперше розроблено* метод розподілу ресурсів між каналами багатоканального пристрою, який інтегрує результати аналізу стану радіосередовища та модель розподілу трафіку за рахунок поєднання профілювання потоків даних за категоріями доступу із прогнозуванням їхнього часу зайнятості радіоресурсу та оптимізацією матриці розподілу навантаження, що дозволяє забезпечити узгоджене керування каналами для підвищення сумарної пропускної здатності та мінімізації затримок доставки пакетів при багатоканальній роботі.

Завдяки цьому вдалося успішно зв'язати процеси профілювання трафіку з прогнозуванням зайнятості ефіру. Це, у свою чергу, розв'язує комплексну задачу планування ресурсів.

Практичне значення та впровадження результатів

Практична цінність дослідження Табора Д.І. полягає у створенні математичних моделей та методів, які є основою для програмного забезпечення контролерів доступу до середовища багатоканальних пристроїв стандарту IEEE 802.11be. Розроблені рішення дозволяють автоматизувати динамічний вибір частотних конфігурацій та реалізувати узгоджене керування навантаженням між каналами для максимізації пропускної здатності. Високий ступінь прикладної орієнтованості роботи підтверджується актами впровадження наукових результатів на ПНВП «Сардер Телеком» під час розробки методів моніторингу продуктивності телекомунікаційних мереж. Крім того, матеріали дисертації впроваджені в освітній процес Навчально-наукового інституту телекомунікацій ДУІКТ і застосовуються при викладанні фахових дисциплін «Сенсорні бездротові мережі» та «Проектування телекомунікаційних систем та мереж».

Апробація та повнота викладу

Робота Табора Дениса пройшла належну апробацію, напрацювання представлені на 3 профільних конференціях, включаючи міжнародну «The Ninth International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems».

Публікації здобувача повністю задовольняють нормативні вимоги. Основні результати викладені у 5 статтях у фахових виданнях України категорії «Б», в яких повною мірою відображені всі результати дослідження. Окремо можна відзначити що усі 5 фахових статей написані автором одноосібно. Повнота викладу матеріалу є вичерпною.

Академічна доброчесність

Дисертація є самостійною науковою працею. Ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання і використані для обґрунтування наукових позицій здобувача. Перевірка тексту роботи на плагіат підтвердила відсутність неправомірних запозичень.

Зауваження

В цілому можна високо оцінити ґрунтовність проведеного дослідження та актуальність запропонованих рішень для мереж Wi-Fi 7, але варто окреслити кілька аспектів, які лежать у площині практичної реалізації та можуть бути враховані при майбутніх розробках.

Перш за все, поза фокусом уваги залишилося питання енергетичної ефективності. Розподіл трафіку між кількома лінками в режимі MLO вимагає одночасної активності декількох радіотрактів, що є критичним викликом для мобільних пристроїв з автономним живленням. Було б цікаво побачити у майбутньому дослідження компромісу між досягнутим приростом пропускну здатності та зміною енергоефективності.

Другий аспект стосується гетерогенності реального парку обладнання. Розроблена математична модель спирається на ідеалізоване виконання протоколів стандарту IEEE 802.11be всіма учасниками мережі. Проте на практиці обладнання від різних вендорів часто має специфічні особливості. Оцінка стійкості запропонованого методу розподілу ресурсів до таких "нестандартних" поведінок сусідніх пристроїв значно підвищить практичну цінність дослідження.

Крім того, хоча імітаційне моделювання підтверджує ефективність механізмів синхронізації, залишається відкритим питання поведінки системи в умовах раптових непередбачуваних завад не-Wi-Fi природи. Миттєва деградація каналу може зробити заплановану MAC-рівнем матрицю розподілу неактуальною ще до завершення циклу передачі.

Висловлені міркування мають характер побажань до подальшого розвитку теми і не ставлять під сумнів достовірність отриманих наукових результатів, а лише підкреслюють багатогранність проблеми управління багатоканальними мережами. Робота є цілком завершеною і відповідає всім кваліфікаційним вимогам.

Висновок

Дисертаційна робота Табора Дениса Івановича на тему «Методи і модель підвищення ефективності передавання багатоканальним пристроєм в мережах стандарту IEEE 802.11be» є самостійним та завершеним дослідженням, яке успішно вирішує актуальне науково-технічне завдання сучасних бездротових мереж.

За своєю актуальністю, новизною та практичною цінністю результатів дисертація повністю відповідає чинним вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова КМУ від 12.01.2022 № 44).

Дисертація рекомендується до захисту, а її автор, Табор Денис Іванович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 - «Телекомунікації та радіотехніка».

Рецензент

професор кафедри Мобільних та
відеоінформаційних технологій
Державного університету
інформаційно-комунікаційних
технологій, доктор технічних наук,
професор

«20» липеня 2026 р

ЛБ

Любов БЕРКМАН

Підпис

Л. Беркман

ЗАСВІДЧУЮ

Учений секретар
Державного університету
інформаційно-комунікаційних технологій

