

УДК 621.391

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.045056

А. В. ЛЕМЕШКО, ст. викладач;
А. О. МАКАРЕНКО, доктор техн. наук, доцент;
Н. В. РУДЕНКО, ст. викладач;
О. М. ТКАЧЕНКО, доктор техн. наук, доцент;
С. В. САВЧУК, аспірант,
Державний університет телекомунікацій, Київ

РОЗРОБЛЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ КОНТРОЛЮ ЧУТЛИВОСТІ ЗОНИ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТОЧОК ДОСТУПУ СТАНДАРТУ IEEE 802.11ax

Досліджено технічні особливості нового стандарту 802.11ax, якому для зручності надано абревіатуру Wi-Fi 6. До них належать: підтримання діапазонів 2,4 і 5 ГГц; підтримання OFDMA; спільна робота MU-MIMO і OFDMA; функція Target Wake Time. Технологія OFDM розділяє канали передавання даних на кілька піднесучих, забезпечуючи більш високу надійність з'єднання і покриття мережі. У 802.11ax кількість піднесучих зростає вчетверо через довший захисний інтервал OFDM, що посприяє збільшенню покриття мережі і, відповідно, швидкості Wi-Fi 6 на 11%. Завдяки ширині каналу до 160 МГц стандарт 802.11ax забезпечить неймовірну швидкість з'єднання. Таким чином, 802.11ax збільшує продуктивність завдяки одночасному передаванню до восьми потоків даних кільком клієнтам одночасно. Крім цього, Wi-Fi 6 підтримує опцію MU-MIMO для вихідного каналу, коли одна антена передає дані одному абоненту.

Проведено дослідження ефективності стандарту IEEE 802.11ax, тобто BSS Color, і впливу порога перекриття зон обслуговування в різних випадках. Запропоновано удосконалений алгоритм контролю чутливості налаштування порога перекриття зон обслуговування як на точки доступу, так і на мобільні станції, який не потребує значних змін на MAC-рівні. Удосконалений алгоритм контролю чутливості регулює перекриття зон обслуговування на основі спостережуваного рівня завад і показника рівня сигналу, що приймається від відповідного одержувача. Удосконалений алгоритм контролю чутливості порівнюється з динамічним контролем чутливості — алгоритмом, який спочатку було запропоновано для очищення каналу і також використано у Wi-Fi 6 для настроювання порогового значення перекриття зон обслуговування. Показано, що вдосконалений алгоритм контролю чутливості перевершує зазначені схеми (до 47% стосовно зростання пропускну здатності) у більшості змодельованих випадків, зберігаючи при цьому справедливість серед користувачів. Водночас удосконалений алгоритм контролю чутливості розширює можливості передавання для мобільних станцій (майже однакова ймовірність для всіх користувачів у зоні обслуговування), що також зумовлює більш високий рівень конкуренції. Однак конкуренцію користувачів можна керувати за допомогою інших засобів, спеціально розроблених для її вирішення, таких як поріг очищення каналу і розмір вікна конкуренції.

Ключові слова: Wi-Fi 6; OFDM; MU-MIMO; BSS Color; IEEE 802.11ax; безпроводові локальні мережі; динамічний контроль чутливості; удосконалений алгоритм контролю чутливості.

ВСТУП

Подібно до стільникових технологій, безпроводові локальні мережі (БЛМ) стандарту 802.11 набувають дедалі більшого розвитку, щоб іти в ногу зі швидкими змінами і новими потребами користувачів, з якими стикається телекомунікаційна галузь. Експоненціальне зростання трафіку мобільних даних, кількість пристроїв, підімкнених до мережі Інтернет, нові сценарії використання і вимоги користувачів є основними проблемами для 5G-мереж [1].

Безпроводові локальні мережі (Wi-Fi) задовольняють вимоги, що висуваються до безпроводових з'єднань для реалізації зв'язку в будівлях і офісах. Сьогодні у світі майже 15 млрд пристроїв під'єднано до Wi-Fi. Зростаючий обсяг трафіку — виклик для безпроводових мереж майбутнього. Wi-Fi 6 — це новітній стандарт, покликаний вирішити це завдання [2].

Очікується, що завдяки успіху та перевагам, які пропонує технологія БЛМ, вона буде відігра-

вати ключову роль у формуванні 5G-мереж. Зокрема, це економічне рішення, яке можна легко розгорнути (наприклад, у квартирах, офісах тощо), забезпечивши доступ до мережі Інтернет із високою швидкістю передавання даних. Однак незаплановане і некероване розгортання точок доступу (ТД) погіршує продуктивність мережі через проблеми із завадами.

Щоб задовольнити потреби і вирішити нові проблеми, з якими БЛМ зіткнуться в діапазонах частот 2,4 і 5 ГГц, 2014 року було представлено стандарт IEEE 802.11ax [3], а восени 2019 його було сертифіковано [4].

На відміну від своїх попередників, націлених на підвищення пропускну здатності каналу, 802.11ax (Wi-Fi 6) фокусується на зростанні ефективності використання спектра і пропускну здатності в щільних сценаріях БЛМ з одночасним зниженням енергоспоживання портативних пристроїв [4]. Крім того, Wi-Fi 6 охоплює додаткові смуги між 1 і 7 ГГц у міру їх появи.

1024-QAM і збільшена довжина символу OFDM забезпечують високу швидкість Wi-Fi і розширене покриття мережі. Разом із MU-MIMO для вхідного і вихідного потоків технологія OFDMA оптимізує розподіл частот, а BSS Color підвищує пропускну здатність роутера, усуваючи пересічні сигнали клієнтів [5].

Технологія OFDM розділяє канали передавання даних на кілька піднесучих, забезпечуючи більш високу надійність з'єднання і покриття мережі. У 802.11ax кількість піднесучих зростає вчетверо завдяки довшому захисному інтервалу і символу OFDM, що сприяє збільшенню покриття мережі і, відповідно, швидкості Wi-Fi AX на 11%.

Завдяки ширині каналу до 160 МГц стандарт 802.11ax може забезпечити неймовірну швидкість з'єднання [2; 5].

Отже, 802.11ax збільшує продуктивність завдяки одночасному передаванню до восьми потоків даних кільком клієнтам одночасно. Крім цього, Wi-Fi 6 підтримує опцію MU-MIMO для вихідного каналу, коли одна антена передає дані одному абоненту.

Зворотна сумісність — одна з основних вимог специфікації Wi-Fi 6, оскільки очікується, що гетерогенні пристрої будуть працювати на одній і тій самій частоті. До інших функцій, поданих у цій поправці на цей час, належать удосконалення для малих стільникових мереж (вищий порядок модуляції, 1024-QAM), методи з кількома антенами (MU-MIMO), ефективне використання ресурсів каналу (OFDMA) і методи просторового повторного використання (ППВ) [4–6]. Механізми ППВ спрямовано на збільшення кількості одночасних каналів зв'язку в цьому діапазоні для поліпшення пропускну здатності діапазону та ефективності використання спектра. Загалом, ППВ містить ті схеми, які адаптують визначення несучої або використовують керування потужністю передавання (КПП). Хоча різні схеми ППВ широко вивчено для безпроводових мереж [9–11], проте використання КПП було стандартизовано тільки 2003 року. Зокрема, IEEE 802.11h-2003 визначає правила максимальної потужності передавання в діапазоні [6; 7].

Завади від сусідніх безпроводових мереж негативно впливають на якість сигналу. BSS Color — ідентифікатор, який позначає пакет. Тому роутер або смартфон під час передавання ідентифікують тільки один одного, а інші сигнали ігнорують [2–5].

У цій статті основну увагу приділено механізму IEEE 802.11ax ППВ і останнім результатам досліджень, поданих у Wi-Fi 6. Схема ППВ, яку сьогодні введено в Wi-Fi 6, а саме маркування базового набору послуг (BSS Color) є вдосконаленим нещодавно запропонованим методом [4]. У цьому сенсі

ППВ — це абсолютно нова функція, яку додано в Wi-Fi 6.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Розроблення вдосконаленого алгоритму контролю чутливості

IEEE 802.11 — це асинхронна технологія, заснована на методах довільного доступу для надання інтернет-з'єднання по безпроводовому середовищу. Вона використовує протокол множинного доступу з контролем несучої і запобіганням конфліктів (CSMA/CA), який має на увазі, що кожний вузол виявляє канал до передавання. Якщо енергія, виміряна на каналі, перевищує порогове значення для оцінювання чистоти каналу, то канал визначається як зайнятий, і передавання відкладається. В іншому разі канал оголошується як вільний, і вузол переходить до передавання кадру [2; 8].

Отже, із викладеного випливає, що ймовірність передавання великою мірою залежить від значення порога вільного каналу. Низький поріг призводить до низької можливості передавання (великий діапазон виявлення несучої), тоді як агресивне значення може зумовити більш високу ймовірність передавання даних. Подібно до порога вільного каналу рівень потужності передавання також впливає на ймовірність передавання. Зокрема, під час використання високого рівня потужності передавання віддалені вузли можуть її ідентифікувати, що впливає на їх можливості передавання.

Для коригування граничного значення вільного каналу було застосовано різні підходи. Алгоритм, поданий у [9; 10], містить поправку IEEE 802.11k для отримання статистики, необхідної для настроювання порога. Більш того, вузли періодично передають свої звіти про вимірювання в точку доступу, яка, у свою чергу, обробляє всі звіти і передає цю інформацію через контрольний сигнал. Схему для настроювання порога вільного каналу було запропоновано в [10]. Децентралізований підхід, заснований на індикації сигналу контрольних сигналів показника рівня сигналу, що приймається (ПРПС), показано в [11]. Тут значення межі допуску віднімається з ПРПС записаних контрольних сигналів, при цьому також використовується верхня межа (UpperLimit), яка відповідає максимальному порогу вільного каналу. Зокрема алгоритм [12], а саме динамічний контроль чутливості (ДКЧ).

Хоча ДКЧ спочатку було запропоновано IEEE як метод ППВ для настроювання порогових значень порога вільного каналу, нещодавно його було також рекомендовано для настроювання рівня перекриття зон обслуговування (ПЗО) [4; 6; 12].

Основним недоліком алгоритму ДКЧ, запропонованого для використання у Wi-Fi 6, є те,

що станції (СТ), розташовані поруч із ТД, мають більш високу ймовірність доступу до середовища через вищий ПРПС, що призводить до меншої дальності виявлення несучої [9; 10; 12; 13].

Щоб усунути недоліки ДКЧ, було розроблено вдосконалений алгоритм контролю чутливості (АКЧ), який визначає перекриття на основі ПРПС між зонами та всередині зон обслуговування (BSS Color). АКЧ призначено для роботи як між ТД, так і СТ. До основних завдань АКЧ належать:

- захист поточного передавання;
- підтримання якості роботи СТ на межі стільника;
- збереження справедливості для всіх вузлів стосовно конкуренції за канали (майже однакова ймовірність передавання для всіх вузлів). Блок-схему алгоритму АКЧ зображено на рис. 1. АКЧ запускається відповідно до консервативного підходу (визначення рівня ПЗО встановлюється на мінімальне значення) для виявлення більшості вузлів у його близькості.

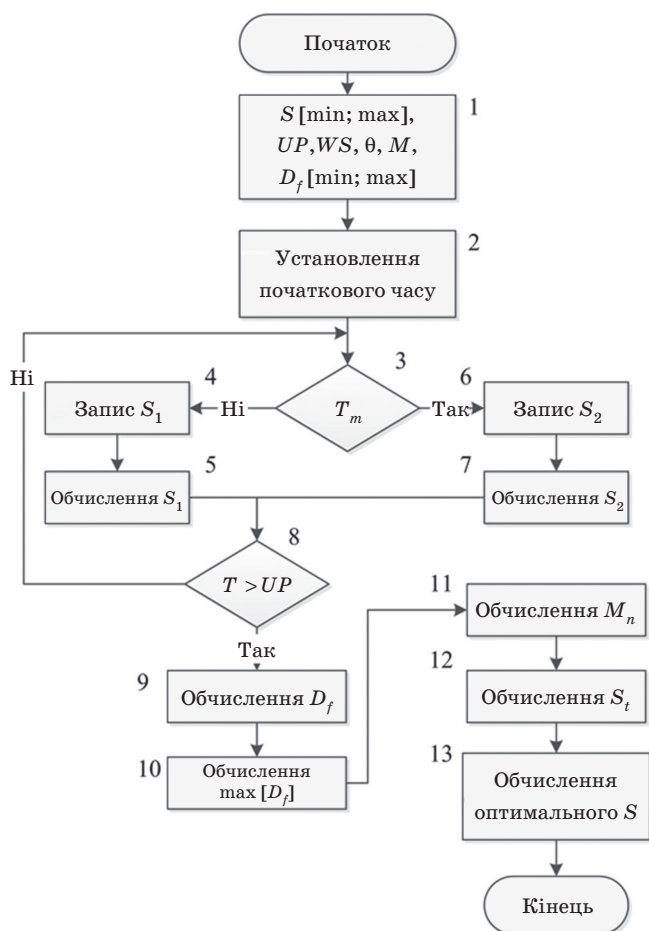


Рис. 1. Удосконалений алгоритм контролю чутливості

Перейдемо до докладного опису роботи алгоритму. У першому блоці здійснюється зчитування вхідних даних. Крок 3 — перевіряється значення маркування T_m зон обслуговування (ЗО) і визначається, кадр є внутрішнім чи зовнішнім. Алгоблоки

4 і 6 записують ПРПС перед тим, як відмовитися або продовжити приймання. На етапах 5, 7 вузли нагромаджують записаний ПРПС для кадрів ЗО і ПЗО з використанням будь-якої схеми змінного середнього. *WindowSize (WS)* визначає розмір вікна для схеми змінного середнього. Якщо час перевищив *UpdatePeriod (UP)*, АКЧ переходить до блока 8, в іншому разі він очікує отримання наступного кадру. Наприклад, *UP* може дорівнювати *N* інтервала контрольного сигналу.

На етапі 9 застосовується таке рівняння:

$$D_f = |S_1 - S_2|, \quad (1)$$

де S_1, S_2 — здобуті дані на основі відповідно ЗО ПРПС і ПЗО ПРПС.

Основна ідея формули (1) — визначити, чи розміщено станції ЗО ближче до джерел завад ПЗО чи ні, а не до їх одержувачів; ця інформація використовується на етапі 11. Крок 10 важливий, щоб уникнути поділу на нуль на етапі 11, де межа допуску M розраховується за формулою

$$M_n = \frac{M}{D_f \theta - 1} + M, \quad (2)$$

де θ — ціле число, яке вводиться для подальшого підсилення ролі межі допуску. У деяких випадках може знадобитися більш висока M для успішного передавання користувачеві на межі стільника або під час використання високих швидкостей передавання даних. Таким чином, замість того щоб ТД оголошувати нові значення M , вони можуть налаштувати θ . Високе значення θ призводить до високого M_n відносно M навіть для більшого значення D_f . Зі збільшенням θ значення D_f мало впливає на остаточне значення M_n . І, нарешті, високі значення D_f незначно впливають на M_n незалежно від θ і M . Чим вища M , тим більша різниця між двома значеннями M_n для різних значень D_f .

Через характер безпроводового розгортання ПЗО СТ може бути вищим, ніж ЗО СТ в ТД, або тому, що вони ближче, або через затінення. Точки доступу мають гарантувати, що СТ ЗО успішно отримають кадри за наявності станцій ПЗО, тому на етапі 12 виконується таке обчислення:

$$S_t = \min(\overline{S_1}, \overline{S_2}) - M_n. \quad (3)$$

Перед налаштуванням ПЗО поріг обмежується мінімальним і максимальним рівнями ПЗО, що можна побачити на кроці 13:

$$S = \min[\max(S_t, S_{\min}), S_{\max}]. \quad (4)$$

До того ж, для зменшення складності реалізації зі збереженням більшої частини переваг, пропонованих алгоритмом АКЧ, деякі кроки можуть бути пропущені для АКЧ, що працює на СТ. Наприклад, запис ПРПС від ЗО кадрів і кроку 11 можна пропустити, тоді як S_1 можна замінити на S_2 у блоці 12.

Додатковий (необов'язковий) крок на СТ для встановлення мінімального порога ПЗО також

може бути розгорнуто, щоб зберегти можливість передавання для користувачів на межі стільника. Користувач на межі стільника може отримати вигоду з більш високого порога ПЗО, ніж користувач, який не перебуває на межі стільника, коли два користувачі приймають приблизно однаковий рівень завад. Основна ідея полягає в тому, щоб визначити функцію, яка оберігає користувачів на межі стільника від використання надзвичайно консервативного порога, що може спричинити істотно низькі можливості передавання. Наприклад, для встановлення мінімального порога ПЗО можна скористатись такою формулою:

$$S_{\min} = S_{def} + \frac{D_{f\max}}{1 + \exp(s_a \alpha - s_b)}, \quad (5)$$

де S_{\min} — мінімальне значення за замовчуванням для ПЗО (тобто -80 дБм для ширини смуги каналу 20 МГц); $D_{f\max}$ — максимальне значення, яке можна дістати з S_{def} ; параметр α може бути або середнім ПРПС від пов'язаної ТД, або D_f ; D_f прагне до нуля в міру того, як користувач віддаляється від ТД, оскільки рівень завад збільшується, а ПРПС від ТД зменшується, припускаючи, що існують сусідні ЗО; параметри s_a та s_b можна відрегулювати залежно від швидкості загасання або порога, якого нам потрібно досягти.

Імітаційне моделювання ефективності роботи вдосконаленого алгоритму контролю чутливості

Щоб здобути результати роботи АКЧ, доцільно застосувати імітаційне моделювання. Для цього використаємо Mathcad — інструмент для організації, обчислення та візуалізації інженерних розрахунків. Аркуш Mathcad містить значення, рівняння, графіки та функції, які записуються та відображаються способом, подібним до того, як їх написано в підручнику чи довідковому посібнику. Оскільки вхідні дані на робочому аркуші оновлюються, то оновлюються і всі залежні розрахунки. Mathcad — це інший обчислювальний інструмент, ніж повна мова програмування, наприклад MATLAB або Python, або навіть мова електронних таблиць, зокрема VBA. Загалом, Mathcad найкраще підходить для символічного або чисельного аналізу для заміни інженерного графічного калькулятора або обчислювальної панелі. Це не так добре підходить для оброблення великих обсягів табличних даних або якщо швидкість обчислення є пріоритетом. Натомість корисно виводити символічні вирази, візуалізувати дані та швидко прототипувати проблему, яка є типовою для інженерних домашніх завдань [14; 15].

Проаналізуємо сценарій роботи схем BSS Color, ДКЧ і АКЧ стосовно пропускної здатності та справедливості. Зазначимо, що цей сценарій відповідає списку базових сценаріїв Wi-Fi 6 [16]. Роз-

глянуто чотири різних випадків, зокрема трафік DL і UL , а також різні шаблони ЗО, які ввімкнено відповідно до процедури, описаної в [17; 18]. Так, перші три випадки (тобто, DL/DL , DL/UL , UL/UL) належать до сценаріїв, коли ввімкнено тільки ЗО А і В, тоді як останній випадок ($3 \times DL$) належить до сценарію, коли ввімкнено всі ЗО. Прийmemo умову відсутності колізій маркування, яка означає, що BSS Color унікальний для кожної ЗО. Використовуються дві різні швидкості передавання даних: надійна високоефективна схема модуляції і кодування BPSK і 64-QAM, тоді як модель поширення визначається за сценарієм, поданим у Wi-Fi 6.

Порівняння максимальної пропускної здатності, досягнутої для АКЧ і ДКЧ, із характеристиками BSS Color (увімкнутими та вимкнутими) зображено на рис. 2. З цього рисунка можна дійти шести важливих висновків.

По-перше, коли BSS Color увімкнено, можна спостерігати збільшення пропускної здатності порівняно ніж у разі вимкнення. Однак це сильно залежить від типу трафіку і сценарію, оскільки використання консервативного порога ПЗО може не вплинути на продуктивність мережі, як це можна побачити в разі DL/DL .

По-друге, більш високої пропускної здатності можна досягти настроюванням порогового значення ПЗО.

По-третє, АКЧ забезпечує найвищий виграш у пропускній здатності в усіх випадках серед зазначених методів, за винятком сценарію UL/UL . Зокрема, під час використання АКЧ для випадку DL/DL може спостерігатися приріст пропускної здатності до 47% порівняно з методами ДКЧ та з маркуванням і без.

По-четверте, у разі вимкнення BSS Color спостерігається втрата пропускної здатності для UL/UL . Це пов'язано з великою кількістю конкуруючих СТ у ЗО.

По-п'яте, на справедливість сильно впливає ввімкнення маркування, як це унаочнює рис. 2. За винятком випадку UL/UL , у всіх інших змодельованих випадках справедливість між ЗО поліпшується завдяки використанню АКЧ, оскільки ймовірність передавання між ЗО приблизно однакова (наприклад, $3 \times DL$).

І, по-шосте, невеликий приріст пропускної здатності в DL/DL для 64-QAM, коли ввімкнено маркування, відбувається через розширення міжкадрової відстані, яке застосовується після невдалого приймання. Зокрема, коли ввімкнено маркування і після маркувальної невідповідності вузол відмовляється від приймання і не використовує розширення міжкадрової відстані. До того ж, розширення міжкадрової відстані не впливає на пропускну здатність під час використання BPSK,

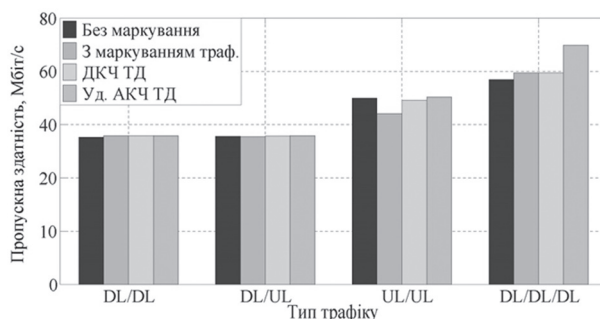
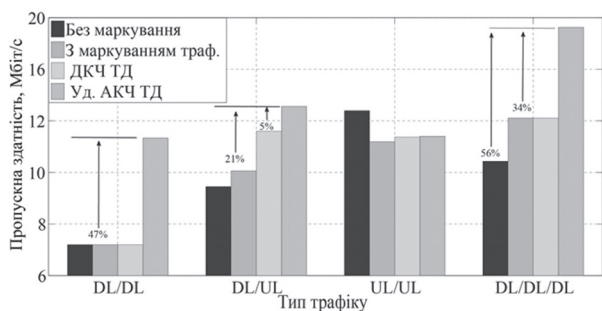


Рис. 2. Порівняння схем увімкнення стосовно пропускної здатності та справедливості: а — підсумкова пропускна здатність для BPSK; б — підсумкова пропускна здатність для 64-QAM

оскільки ця швидкість передавання даних більш стійка до завад.

Коли BSS Color увімкнено, кількість конкуруючих СТ у ЗО А збільшується порівняно з вимкненим, особливо для алгоритму АКЧ. Водночас, коли BSS Color вимкнено, СТ у ЗО А, розміщені між ЗО А і ЗО В, можуть сприймати канал як зайнятий, коли відбувається передавання UL в ЗО В, зменшуючи кількість конкуруючих СТ у ЗО А. Ефективний спосіб знизити частоту конфліктів у ЗО А — налаштувати вікно конкуренції для кадрів усередині ЗО. Зі зменшенням кількості СТ у ЗО А і зменшенням конкуренції продуктивність BSS Color поліпшується. ДКЧ перевершує АКЧ через те, що перший алгоритм знижує можливість передавання для користувача на межі стільника, зумовлюючи зниження конкуренції. Однак, коли S_{min} відповідним чином регулюється (конкуренція може зменшитися), тоді вираш у пропускній здатності для АКЧ вищий і перевершує ДКЧ (кількість СТ в обох ЗО приблизно однакова).

Отже, після аналізу результатів доходимо висновку, що поріг ПЗО слід відрегулювати у такий спосіб, щоб поліпшити продуктивність мережі і повністю використовувати BSS Color. Значення M для настроювання ПЗО є важливим параметром як для алгоритмів ДКЧ, так і для АКЧ і істотно впливає на зростання пропускної здатності. АКЧ здебільшого забезпечує вищий приріст пропускної здатності, ніж ДКЧ (до 47%), оскільки враховує зміни, що відбуваються в ПЗО. Проте зі збереженням рівноправності для користувачів в ЗО конкуренція між ними збільшується, а отже, це призводить до втрати пропускної здатності, як це показано на рис. 2. Однак конфліктом між користувачами можна керувати за допомогою інших засобів, спеціально розроблених для його вирішення (наприклад, вікно конкуренції тощо).

ВИСНОВКИ

У статті проведено дослідження ефективності стандарту IEEE 802.11ax, тобто BSS Color, і впливу порога ПЗО в різних випадках. Запропоновано

АКЧ-алгоритм налаштування ПЗО як на ТД, так і на СТ, який не потребує значних змін на MAC-рівні. АКЧ регулює ПЗО на основі спостережуваного рівня завад і ПРПС від відповідного одержувача. АКЧ порівнювався з ДКЧ — алгоритмом, який спочатку був запропонований для очищення каналу і також використаний у Wi-Fi 6 для настроювання порогового значення ПЗО. Показано, що АКЧ перевершує зазначені схеми (до 47% стосовно збільшення пропускної здатності) у більшості змодельованих випадків, зберігаючи при цьому справедливість серед користувачів. Водночас АКЧ збільшує можливості передавання для СТ (майже однакова ймовірність для всіх користувачів у ЗО), що також зумовлює більш високий рівень конкуренції. Однак конкуренцією користувачів можна керувати за допомогою інших засобів, спеціально розроблених для її вирішення, зокрема порога очищення каналу і розміру вікна конкуренції.

Список використаної літератури

1. Maniewicz M. The importance of terrestrial wireless communications [Електронний ресурс] // ITU. URL: https://www.itu.int/en/itu-news/Documents/2019/2019-04/2019_ITUNews04-en.pdf
2. Wi-Fi 6: The Next Generation of Wireless [Електронний ресурс] // Cisco. URL: https://meraki.cisco.com/lib/pdf/meraki_whitepaper_wifi6.pdf
3. Скрипич В. Новая эра Wi-Fi началась. Сертифицированы первые устройства с поддержкой новейшего стандарта Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) [Електронний ресурс] // ITC. URL: <https://itc.ua/news/novaya-era-wi-fi-nachalas-sertificirovany-pervye-ustrojstva-s-podderzhkoj-novajshego-CTndarta-wi-fi-6-ieee-802-11ax/>
4. Wi-Fi certified 6 [Електронний ресурс] // Wi-Fi Alliance. URL: <https://wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-certified-6>
5. Шосте покоління Wi-Fi [Електронний ресурс] // Wi-Fi Alliance. URL: <https://www.tp-link.com/uk-ua/wifi6/>

6. **Kyu-Haeng Lee.** *Using OFDMA for MU-MIMO User Selection in 802.11ax-Based Wi-Fi Networks* [Електронний ресурс] // IEEE Xplore. URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8936379>

7. **Chapter: Transmit Power Control (TPC) Algorithm** [Електронний ресурс] // Cisco. URL:

https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/technotes/8-1/mobility_express/b_RRM_White_Paper/b_RRM_White_Paper_chapter_0101.html

8. **Next-generation Standards Deliver More Efficient Wi-Fi** [Електронний ресурс] // Fortinet. URL:

<https://www.fortinet.com/content/dam/fortinet/assets/white-papers/wp-next-generation-standards-deliver-more-efficient-wifi.pdf>

9. **Mangold S.** *IEEE 802.11k: improving confidence in radio resource measurements* [Електронний ресурс] // IEEE Xplore. URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/1651593>

10. **802.11v-2011 – IEEE Standard for Information technology** [Електронний ресурс] // IEEE Xplore. URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8936379>

11. **Parag Kulkarni.** *Taming the densification challenge in next generation wireless LANs: An investigation into the use of dynamic sensitivity control* [Електронний ресурс] // IEEE Xplore. URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7348052>

12. **Shahwaiz Afaqui M.** *Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for IEEE 802.11ax* [Електронний ресурс] // IEEE Xplore. URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7127616>

13. **A Practical IEEE 802.11ax BSS Color Aware Rate Control Algorithm** [Електронний ресурс] // Springer Nature. URL:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10776-019-00439-6>

14. **Introduction to Mathcad for Engineers** [Електронний ресурс] // Learn Programming. URL:

<http://apmonitor.com/che263/index.php/Main/MathcadIntroduction>

15. **PTC Mathcad 15.0** [Електронний ресурс] // PTC. URL:

<https://www.mathcad.com/ru/try-and-buy/free-trial>

16. **High Efficiency (HE) Wireless LAN Task Group** [Електронний ресурс] // IEEE P802.11. URL:

https://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm

17. **802.11ax Parameterization for Waveform Generation and Simulation** [Електронний ресурс] // MathWorks. URL:

<https://www.mathworks.com/help/wlan/examples/802-11ax-parameterization-for-waveform-generation-and-simulation.html>

18. **Barrachina-Munoz S.** *Wireless Network Simulator for Next-Generation High-Density WLANs* [Електронний ресурс] // IEEE Xplore. URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8734225>

А. В. Лемешко, А. А. Макаренко, Н. В. Руденко, О. Н. Ткаченко, С. В. Савчук

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЗОНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТОЧЕК ДОСТУПА СТАНДАРТА IEEE 802.11ax

Исследованы технические особенности нового стандарта 802.11ax, которому для удобства присвоена аббревиатура Wi-Fi 6. К ним относятся: поддержка диапазонов 2,4 и 5 ГГц; поддержка OFDMA; совместная работа MU-MIMO и OFDMA; функция Target Wake Time. Технология OFDM разделяет каналы передачи данных на несколько поднесущих, обеспечивая более высокую надежность соединения и покрытия сети. В 802.11ax количество поднесущих возрастает вчетверо благодаря длинному защитному интервалу OFDM. Это способствует увеличению покрытия сети и, соответственно, скорости Wi-Fi 6 на 11%. Благодаря ширине канала до 160 МГц стандарт 802.11ax обеспечит невероятную скорость соединения. Таким образом, 802.11ax увеличивает производительность благодаря одновременной передаче до восьми потоков данных нескольким клиентам одновременно. Кроме этого, Wi-Fi 6 поддерживает опцию MU-MIMO для выходного канала, когда одна антенна передает данные одному абоненту.

Проведено исследование эффективности стандарта IEEE 802.11ax, т. е. BSS Color и влияния порога перекрытия зон обслуживания в различных случаях. Предложен усовершенствованный алгоритм контроля чувствительности настройки порога перекрытия зон обслуживания как в точки доступа, так и на мобильные станции, который не требует значительных изменений на MAC-уровне. Усовершенствованный алгоритм контроля чувствительности регулирует перекрытие зон обслуживания на основе наблюдаемого уровня помех и показателя уровня принимаемого сигнала от соответствующего получателя. Усовершенствованный алгоритм контроля чувствительности сравнивался с динамическим контролем чувствительности — алгоритмом, который сначала был предложен для очистки канала и также использован в Wi-Fi 6 для настройки порогового значения перекрытия зон обслуживания. Показано, что усовершенствованный алгоритм контроля чувствительности превосходит вышеупомянутые схемы (до 47% с точки зрения увеличения пропускной способности) в большинстве смоделированных случаев, сохраняя при этом справедливость среди пользователей. Вместе с тем усовершенствованный алгоритм контроля чувствительности увеличивает возможности передачи для мобильных станций (примерно одинакова вероятность для всех пользователей в зоне обслуживания), что также приводит к более высокому уровню конкуренции. Однако конкуренцией пользователей можно управлять с помощью других средств, специально разработанных для ее решения, таких как порог очистки канала и размер окна конкуренции.

Ключевые слова: Wi-Fi 6; OFDM; MU-MIMO; BSS Color; IEEE 802.11ax; беспроводные локальные сети; динамический контроль чувствительности; усовершенствованный алгоритм контроля чувствительности.

A. V. Lemeshko, A. O. Makarenko, N. V. Rudenko, O. M. Tkachenko, S. V. Savchuk

**DEVELOPMENT OF AN ADVANCED ALGORITHM FOR SENSITIVITY CONTROL
OF THE SERVICE AREA OF THE IEEE 802.11ax STANDARDS**

The article examines the technical features of the new 802.11ax standard, which for convenience has been assigned the abbreviation Wi-Fi 6. These include: support for 2.4 and 5 GHz bands; OFDMA support; joint work of MU-MIMO and OFDMA; Target Wake Time function. OFDM technology divides data channels into multiple subcarriers, providing higher connection and network reliability. In 802.11ax, the number of subcarriers quadruples due to the long OFDM guard interval. This will help increase the network coverage, and, accordingly, the speed of Wi-Fi 6 by 11%. With channel widths up to 160 MHz, 802.11ax provides incredible connection speeds. Thus, 802.11ax increases performance by simultaneously transmitting up to 8 data streams to multiple clients simultaneously. In addition, Wi-Fi 6 supports the MU-MIMO option for the output channel, when one antenna transmits data to one subscriber.

A study of the effectiveness of the IEEE 802.11ax standard, that is, BSS Color, and the effect of the service area overlap threshold in various cases was carried out. An improved algorithm for controlling the sensitivity of setting the threshold for overlapping service areas both at access points and at mobile stations is proposed, which does not require significant changes at the MAC level. An advanced sensitivity control algorithm adjusts coverage overlap based on the observed interference level and the received signal strength from the respective receiver. The improved sensitivity control algorithm was compared to dynamic sensitivity control, an algorithm that was first proposed to clean up the channel and was also used in Wi-Fi 6 to adjust the coverage threshold overlap. The improved sensitivity control algorithm has been shown to outperform the aforementioned schemes (up to 47% in terms of increased throughput) in most simulated cases, while maintaining fairness among users. On the other hand, the improved sensitivity control algorithm increases the transmission capabilities of mobile stations (roughly the same probability for all users in the service area), which also leads to a higher level of contention. However, user contention can be controlled by other means specially designed to deal with it, such as channel flush threshold and contention window size.

Keywords: Wi-Fi 6; OFDM; MU-MIMO; BSS Color; IEEE 802.11ax; wireless local area networks; dynamic sensitivity control; advanced sensitivity control algorithm

