

УДК 621.391.28

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/11>**Гайдар Ю.Б.**<https://orcid.org/0009-0003-8945-1464>

Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОД ПРИСКОРЕНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ MESH-МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11BE З АДАПТИВНИМ ВИБОРОМ МАГІСТРАЛЬНОГО КАНАЛУ

У статті розглядається актуальна науково-практична задача підвищення ефективності розгортання та функціонування бездротових Mesh-мереж нового покоління стандарту Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be). Основна увага приділена вирішенню проблеми часових затримок, що виникають під час початкової ініціалізації магістральних каналів зв'язку (Backhaul) у діапазоні 5 ГГц. Встановлено, що обов'язкова процедура перевірки доступності каналу (DFS CAC), яка триває від 60 до 600 секунд, створює критичні зони простою мережі («мертві зони»), що негативно впливає на якість досвіду користувачів (QoE) та стабільність мультимедійних сервісів.

Було запропоновано та науково обґрунтовано метод прискореної організації Mesh-мережі, який базується на впровадженні алгоритму двоетапного адаптивного онбордингу вузлів. На відміну від існуючих рішень, що спираються на складну апаратну реалізацію технології Multi-Link Operation (MLO STR), розроблений метод використовує рівень абстракції протоколу IEEE 1905.1 для динамічного керування топологією за допомогою механізму Backhaul Steering. Суть методу полягає у пріоритетному використанні діапазону 6 ГГц (UNII-5) для миттєвого встановлення зв'язку на етапі запуску системи (Fast Start) з подальшим переведенням процедур підготовки енергоефективних каналів 5 ГГц у фоновий режим роботи. У роботі проведено математичне моделювання енергетичних параметрів лінків на основі логарифмічної моделі втрат у вільному просторі. Визначено критичне порогове значення рівня сигналу -67 дБм, при якому ініціюється процедура перемикання на резервний діапазон для збереження високоефективної модуляції 64-QAM. Встановлено, що такий підхід забезпечує додатковий енергетичний вигаиш у 4 дБм в умовах затухання сигналу в перешкодах. Розрахунковим шляхом доведено, що впровадження запропонованого алгоритму дозволяє скоротити час повної ініціалізації від 2.22 до 13.1 разів в залежності від затримки під час DFS сканування, що підтверджує доцільність використання методу для пришвидшення онбордингу та відновлення зв'язку після перезавантаження вузлів мережі. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх імплементації на існуючій елементній базі бездротового обладнання без необхідності критичного здорожчання апаратної частини.

Ключові слова: бездротові Mesh-мережі, Wi-Fi 7, IEEE 1905.1, DFS CAC, Backhaul Steering, адаптивний онбординг, діапазон 6 ГГц.

Постановка проблеми. Сучасні телекомунікаційні системи є фундаментальною складовою критичної інфраструктури, що забезпечує функціонування цифрової економіки. Згідно зі щорічними звітами компанії Cisco [1], станом на 2023 рік близько 70% світового мобільного трафіку передається через Wi-Fi мережі, що робить цю технологію основним засобом «останньої милі». Однак стрімке зростання кількості IoT-пристроїв та вимоги до передачі «важкого» контенту (8K-відео, AR/VR) виявили суттєві обмеження пропускної здатності та радіусу дії існуючих стандартів. На

відповідь цим викликам було розроблено стандарт IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), який пропонує революційні зміни у фізичному рівні передачі даних, зокрема використання діапазону 6 ГГц, а та збільшення ширини каналу до 320 МГц. Проте основним недоліком високочастотних бездротових мереж залишається швидке загасання сигналу при проходженні крізь перешкоди. Для вирішення цієї проблеми використовується технологія Mesh, принципи якої стандартизовані Wi-Fi Alliance у специфікації EasyMesh v6.0 [3]. Незважаючи на прогрес, складність керування такими розподіле-



ними системами значно зросла. Критичною проблемою залишається процес онбордингу – первинного підключення та авторизації нових вузлів.

Традиційні методи в діапазоні 5 ГГц стикаються з вимушеними паузами через роботу механізмів DFS, що створює проблему із довгим очікуванням ініціалізації для користувача. Розв'язання цієї проблеми має важливе практичне значення для створення надійних самовідновлюваних мереж у домашніх та корпоративних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підвищення продуктивності бездротових мереж нового покоління є предметом активних досліджень. У роботі Лю (Liu) та ін. [3] проведено детальний огляд архітектури IEEE 802.11be, де автори наголошують на критичному значенні розширення спектру до 7.125 ГГц. Лопес-Перес (Lopez-Perez) та ін. [4] поглиблюють цей аналіз, вказуючи, що нові функції ЕНТ (Extremely High Throughput) дозволяють досягти теоретичних швидкостей до 46 Гбіт/с.

Особливості побудови Mesh-мереж для Інтернету речей (IoT) розглядає Караш (Qarash) [5], акцентуючи на важливості самоорганізації вузлів. «Проте, як зазначають Джус (Dzhus) та Лобур (Lobur) [6], час збіжності протоколів маршрутизації Mesh-мережі другого рівня (Layer 2) може досягати 45 секунд. Якщо розглядати типовий сценарій побудови магістрального каналу в діапазоні 5 ГГц, до цієї затримки додається обов'язкова процедура перевірки доступності каналу (CAC), яка згідно з вимогами стандарту ETSI EN 301 893 [8], яка створює гарантовану затримку («мертву зону») у комунікації тривалістю мінімум 60 секунд (а для погодних радарів – до 10 хвилин). Ураховуючи час фізичного завантаження пристрою, сумарна тривалість відновлення зв'язку може перевищувати 2 хвилини, а в деяких випадках час відновлення може перевищувати 12 хвилин. Такий значний час простою (Downtime) під час перезавантаження або оновлення екстендера є критичним недоліком, що руйнує користувацький досвід та неприпустимий для сучасних мультимедійних сервісів.

Більшість сучасних робіт пропонують вирішувати це за допомогою технології Multi-Link Operation (MLO). Однак, як показують дослідження Карраскоса-Замаскоїс (Carrascosa-Zamacois) та ін. [8], MLO може призводити до неочікуваних аномалій затримки та ефекту «голодування» (starvation) каналів- критичну ситуацію, за якої передача даних блокується через розсинхронізацію доступу до середовища або неефек-

тивний розподіл черг між радіоінтерфейсами. Крім того, технічна документація Cisco [9] прямо вказує на економічні бар'єри цього підходу: необхідність використання складної апаратної бази для режиму STR призводить до значного подорожчання обладнання та критичного підвищення енергоспоживання. Водночас, експериментальні дослідження Алаутмана (Alauthman) та Шраа (Shraa) [10] підтверджують, що в умовах високої щільності пристроїв навіть Wi-Fi 7 страждає від критичного зростання джитеру та конкуренції за канал, що нівелює переваги низької затримки без додаткових алгоритмів оптимізації

Альтернативні методи, проаналізовані Лі (Lee) та ін. [11], які базуються на технології Wi-Fi Aware (NAN), є енергоефективними, але придатні лише для процедур виявлення сервісів (Service Discovery) та підключення низькошвидкісних IoT-пристроїв, і не можуть гарантувати стабільність магістральних каналів (Backhaul) високої навантаженості.

Іншим підходом є використання механізму Puncturing, описаного у технічних звітах Qualcomm [12], який дозволяє «вирізати» вузьку смугу частот, зайняту завадою, не втрачаючи весь канал. Однак цей метод вирішує проблему інтерференції під час роботи, а не проблему початкової затримки (DFS CAC)

Таким чином, фундаментом для розв'язання проблеми має стати використання протоколу IEEE 1905.1 [13]. Цей стандарт вводить рівень абстракції (Abstraction Layer), що дозволяє об'єднати різноманітні фізичні інтерфейси (Wi-Fi 2.4/5/6 ГГц, Ethernet) у єдиний віртуальний канал зв'язку. Ефективність цього підходу підтверджується специфікацією Wi-Fi EasyMesh [2, с. 27], яка використовує кадрову структуру IEEE 1905.1 як обов'язковий механізм для обміну повідомленнями управління та ідентифікації пристроїв через віртуальні AL MAC-адреси, нівелюючи тимчасову нестабільність окремих радіоканалів

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності розгортання та стабільності функціонування бездротових Mesh-мереж стандарту IEEE 802.11be шляхом розробки методу прискореної організації магістральних каналів зв'язку (Backhaul) на основі двоетапного адаптивного онбордингу, що дозволяє мінімізувати часові затримки, зумовлені процедурами DFS CAC.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати архітектуру Multi-AP та можливості протоколу IEEE 1905.1 для керування топологією.

2. Розробити алгоритм адаптивного вибору каналу (Backhaul Steering) з використанням діапазону 6 ГГц для швидкого старту.

3. Обґрунтувати порогові значення рівня сигналу для перемикавання між діапазонами з урахуванням затухання в перешкодах.

4. Оцінити виграш у часі при ініціалізації мережі за допомогою запропонованого методу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Згідно зі специфікацією EasyMesh v6.0 [2], архітектура мережі базується на розподілі ролей між двома логічними сутностями:

- Multi-AP Controller – центральний вузол, що реалізує алгоритми керування (Control Plane).
- Multi-AP Agent – виконавчий елемент, що транслює команди контролера.

Їхню взаємодію можна побачити на рисунку 1. Фізична зв'язність мережі забезпечується через магістральні канали (Backhaul links). Як

показано на схемі, Multi-AP пристрій 2 підключається до кореневого вузла (Multi-AP пристрій 1) за допомогою Backhaul STA (станції) або через логічний Ethernet-порт. Така деревоподібна топологія дозволяє масштабувати покриття, зберігаючи єдиний логічний простір керування.

Доступ кінцевих користувачів (Клієнт 1, Клієнт 2) до мережі реалізується через інтерфейси Fronthaul AP. Обмін службовою інформацією між Контролером та Агентами відбувається через логічний інтерфейс керування (Multi-AP control interface), який функціонує поверх будь-якого доступного фізичного середовища (L2 bridging), забезпечуючи передачу метрик та команд керування незалежно від типу з'єднання.

Критично важливою частиною Multi-AP є протокол IEEE 1905.1 [13], який створює рівень абстракції (Abstraction Layer – AL). Цей рівень дозволяє приховати від верхніх рівнів моделі

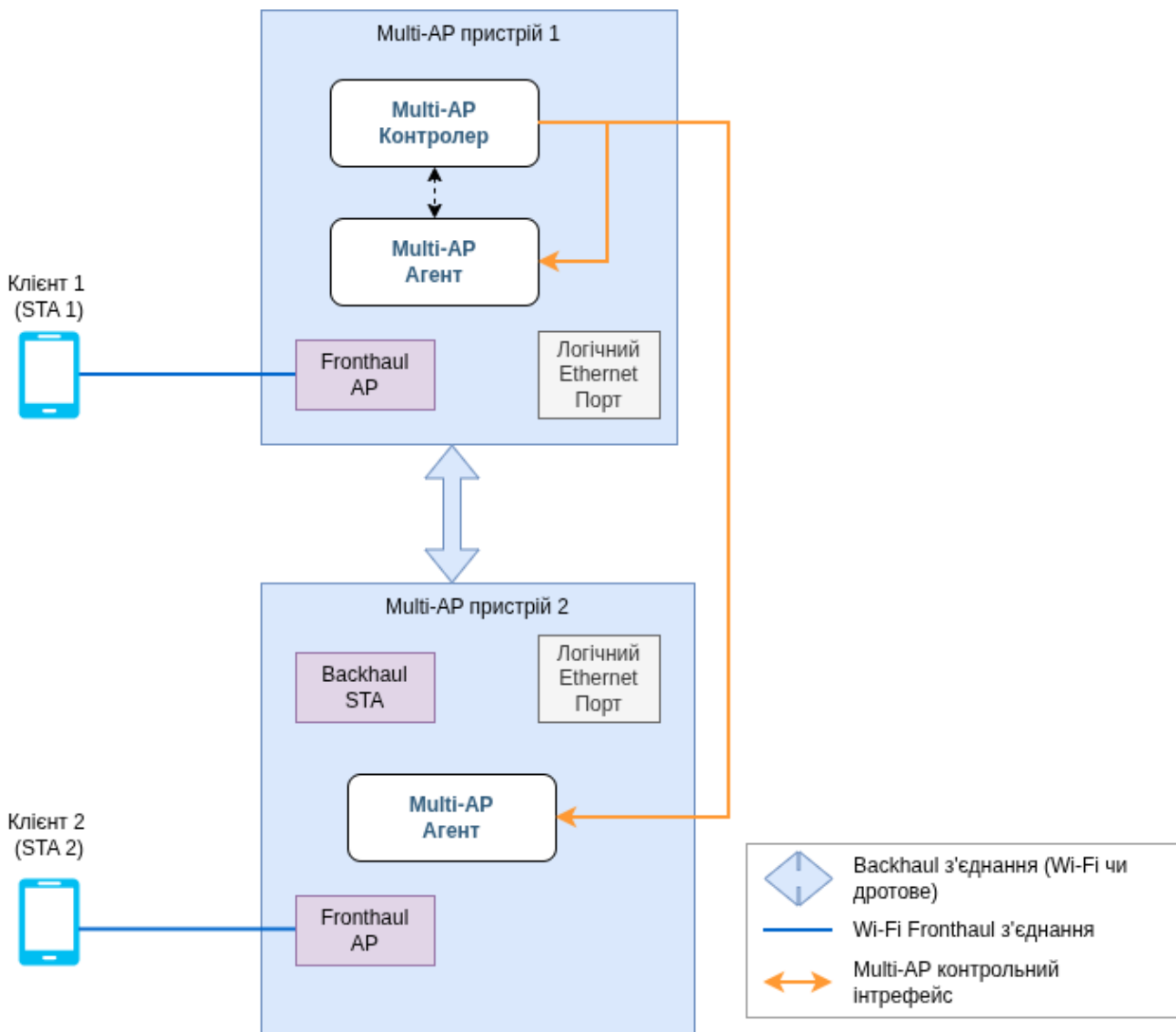


Рис. 1. Архітектура Multi-AP мережі

OSI фізичну природу каналу передачі даних, об'єднуючи Wi-Fi та Ethernet у єдиний логічний інтерфейс. Саме через пакети цього протоколу будуть відбуватись основні процеси методу зміни магістрального каналу зв'язку (Backhaul)

Загалом в цьому процесі можна використати наступні кадри керування (CMDU – Control Message Data Unit), які забезпечують збір метрик та перемикання лінків. Перелік задіяних повідомлень наведено в Таблиці 1.

Суть запропонованого методу полягає у відмові від статичного вибору каналу на користь динамічної моделі кінцевого автомата (State Machine), що дозволяє системі динамічно адаптуватися до змін радіосередовища. Логіка роботи спрямована на мінімізацію часу розгортання мережі (“швидкий старт”) та забезпечення надійності з'єднання в умовах нестабільного покриття.

Процес функціонування системи можна розділити на чотири ключові етапи:

1. Етап ініціалізації (Fast Start)

Алгоритм починається з моменту подачі живлення на пристрій. Пріоритетним завданням є якнайшвидше встановлення зв'язку.

– Система виконує сканування діапазону 6 ГГц (UNII-5).

– Здійснюється перевірка умови $RSSI\ 6\ ГГц > Min$, де Min – мінімальний допустимий рівень сигналу для встановлення стабільного лінку.

– Оскільки діапазон 6 ГГц не вимагає процедури перевірки на наявність радарів (DFS/CAC), у разі задовільного рівня сигналу з'єднання встановлюється миттєво. Це дозволяє уникнути затримки у 60+ секунд, характерної для діапазону 5 ГГц.

2. Режим активної роботи на 6 ГГц (Primary State)

Це основний і найбільш бажаний режим роботи, що забезпечує найвищу пропускну здатність та найменші затримки.

– Фонова підготовка:

Під час передачі даних основним каналом, Агент у фоновому режимі сканує діапазон 5 ГГц. Головна мета – пройти процедуру CAC (Channel Availability Check) тривалістю від 60 до 600 секунд. Це необхідно для того, щоб у разі погіршення

зв'язку на 6 ГГц резервний канал 5 ГГц був уже “чистим” і готовим до миттєвого перемикання.

– Умова переходу

Перемикання на резервний канал 5 ГГц відбувається лише при виконанні двох умов одночасно:

- Поточний рівень сигналу 6 ГГц впав нижче критичного порогу ($RSSI < Порог$)

- Процедура CAC для 5 ГГц успішно завершена.

Якщо умови виконано – ініціюється процедура Steering (перемикання) на 5 ГГц. Якщо ні – система залишається на 6 ГГц, продовжуючи спроби підготувати резервний канал.

3. Режим активної роботи на 5 ГГц (Fallback State)

Цей режим використовується як резервний (Fallback) для забезпечення покриття у зонах, де сигнал 6 ГГц занадто слабкий (через швидке згасання високочастотного сигналу крізь стіни).

– Моніторинг:

Перебуваючи на каналі 5 ГГц, система безперервно прослуховує Beacon-кадри діапазону 6 ГГц, щоб виявити момент покращення умов (наприклад, переміщення користувача ближче до точки доступу або зникнення перешкоди).

– Умова повернення:

Для запобігання ефекту “флапінгу” (частого перемикання туди-сюди), повернення на пріоритетний діапазон 6 ГГц відбувається лише за умови стабільності сигналу.

Перевіряється умова: $RSSI\ 6G > Порог$ та сигнал має залишатися стабільним протягом захисного інтервалу часу ($> 10\ с$).

4. Механізм перемикання (Steering)

Центральним елементом схеми є процес перемикання каналів, який з'єднує два активні стани. Завдяки використанню протоколу IEEE 1905.1 (повідомлення Backhaul Steering Request), перехід здійснюється безшовним для кінцевого користувача, оскільки резервний канал готується заздалегідь (у випадку переходу із 6 ГГц на 5 ГГц) або є доступним миттєво (у випадку з 5 ГГц->6 ГГц).

Блок-схема розробленого алгоритму наведена на рисунку 2.

Таблиця 1

Типи CMDU пакетів IEEE 1905.1 для зміни магістрального каналу (Backhaul)

Message Type (Hex)	Назва повідомлення	Призначення
0x0002	Topology Discovery	Виявлення вузлів та побудова топології при підключенні.
0x0005 / 0x0006	Link Metric Query / Response	Моніторинг параметрів та стану активного каналу.
0x0008	Channel Preference Report	Звіт Агента про статус каналів.
0x0009	Backhaul Steering Request	Команда Контролера на примусове перемикання діапазону.

Для формалізації алгоритму прийняття рішень необхідно визначити енергетичні параметри каналів зв'язку. Для визначення енергетичних параметрів каналів використаємо логарифмічну модель втрат сигналу у вільному просторі (FSPL). Залежність втрат від частоти (f , ГГц) та відстані (d , м) описується рівнянням:

$$FSPL_{db} = 20lg(f) + 20lg(d) + 20lg\left(\frac{4\pi}{c}\right)$$

Де c – швидкість світла, звідки можна вирахувати, що константна складова $20lg\left(\frac{4\pi}{c}\right)$ буде рівна приблизно 32.44. Тоді робоче рівняння має вигляд:

$$FSPL_{db} = 20lg(f) + 20lg(d) + 32.44$$

Ключовим для алгоритму є розрахунок різниці загасання ΔPL між діапазонами 6 ГГц та 5 ГГц, для зручності ми візьмемо центральні канали

в цих діапазонах, звідси їхня частота буде рівна $f_2 \approx 6.2$, а $f_1 \approx 5.2$

$$\Delta PL = 20lg\left(\frac{f_2}{f_1}\right) = 20lg\left(\frac{6.2}{5.2}\right) \approx 1.53 \text{ дБм}$$

Враховуючи емпіричні коефіцієнти поглинання будівельних матеріалів (згідно з ITU-R P.1238) [14], реальна різниця енергетичного бюджету сягає $\Delta PL \approx 4 \text{ дБм}$ на користь діапазону 5 ГГц.

Критичний поріг перемикання ($T_{trigger}$) обрано на основі чутливості приймача для модуляції 16-QAM ($S_{min} \approx -72$ дБм із запасом на завмирання ($M = 5 \text{ дБм}$):

$$T_{trigger} = S_{min} + M = -67 \text{ дБм}$$

Вибір цього порогу зумовлений механізмом адаптивної модуляції (AMC). Падіння сигналу нижче -67 дБм на частоті 6 ГГц призводить до

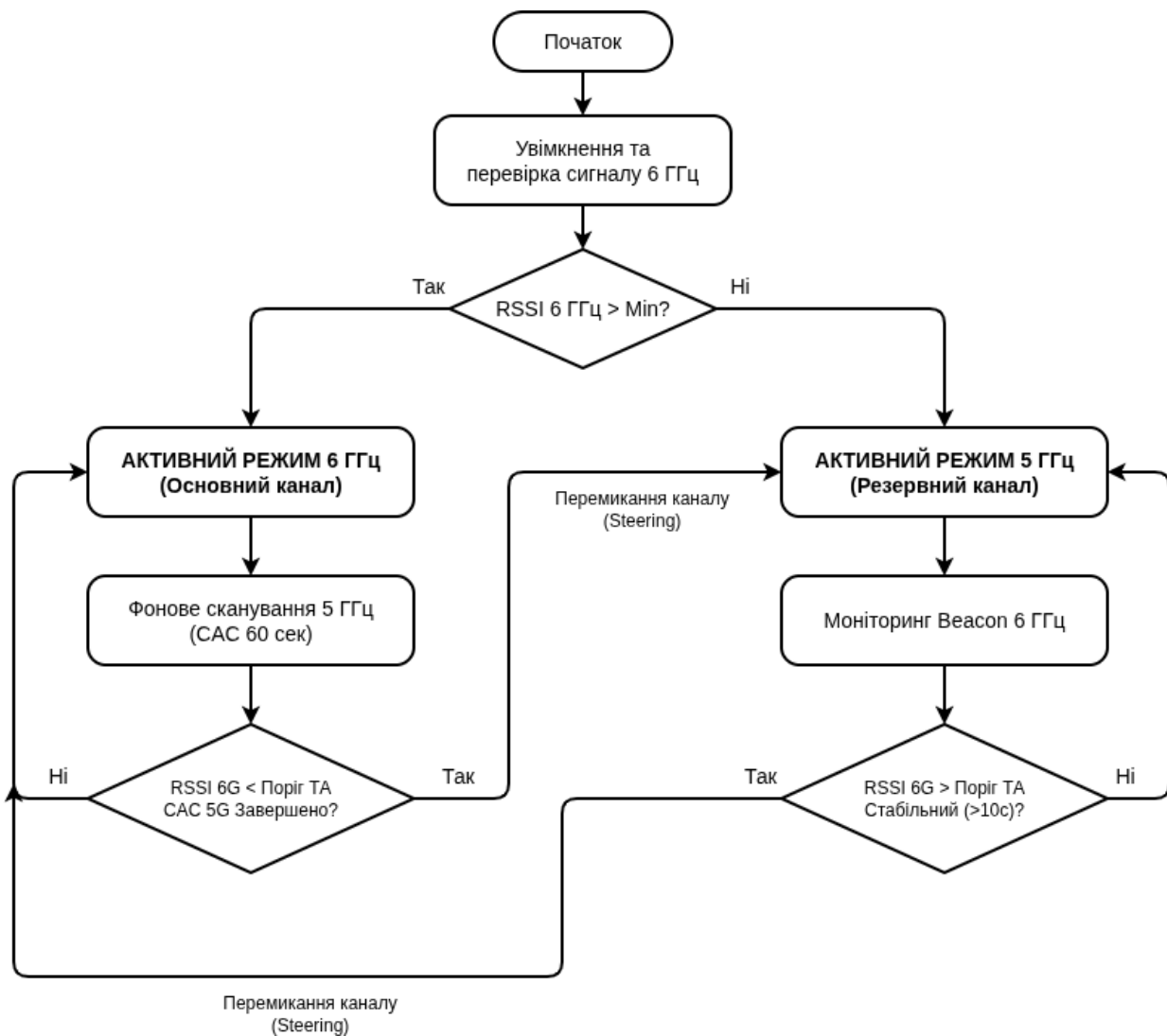


Рис. 2. Блок-схема алгоритму адаптивного керування станами Backhaul-з'єднання

переходу на низькошвидкісні режими (QPSK/ BPSK). Перемикання на 5 ГГц дозволяє отримати енергетичний вигравш у 4 дБ, підвищуючи ефективний рівень сигналу до -63 дБм. Це дає змогу контролеру відновити індекс модуляції до 64-QAM і зберегти високу пропускну здатність каналу.

Окрім стабілізації магістрального каналу, запропонований метод забезпечує значне скорочення часу розгортання мережі. У традиційних системах при першому ввімкненні або перезавантаженні екстендер (Agent) змушений очікувати завершення процедури CAC (Channel Availability Check) на частотах 5 ГГц, що створює період очікування для кінцевих користувачів

Повний час готовності системи до надання сервісу (T_{Σ}) розраховується як сума затримок:

$$T_{\Sigma} = t_{boot} + t_{scan} + t_{assoc}$$

Де t_{boot} – Час завантаження операційної системи агента (приблизно 45с)

t_{scan} – Час вибору та підготовки робочого каналу

t_{assoc} – час авторизації та встановлення сесії IEEE 1905.1 (Приблизно 4с)

Для випадку із 5ГГц Backhaul, до часу вибору каналу додається ще час на сканування радару та клірення каналу, цей час може мати значення від 60 до 600 секунд

Тому, в такому випадку з найкращим сценарієм при паузі у 60 секунд, час готовності системи буде рівний:

$$T_{5ghz} = t_{boot} + t_{scan} + t_{assoc} = 45 + 60 + 4 = 109с$$

А от для випадку із початковою ініціалізацією з діапазоном 6ГГц, підготовка каналу не потребує DFS сканування і час для неї буде рівним часу активного сканування Beacon фреймів (приблизно 0.2с)

$$T_{5ghz} = t_{boot} + t_{scan} + t_{assoc} = 45 + 0.2 + 4 = 49.2с$$

Хоч зараз можливо різниця здається не суттєвою, проте якщо розрахувати коефіцієнт пришвидшення ініціалізації, то він покаже наступне:

$$K_{speed} = \frac{T_{6ghz}}{T_{5ghz}} = \frac{109}{49.2} = 2.22$$

Алгоритм пришвидшив ініціалізацію в 2 рази, і зрозуміло, що при збільшенні паузи для сканування радару в 5ГГц, цей коефіцієнт буде зростати, що в рази пришвидшить ініціалізацію, при довгому DFS скануванні.

Висновки. У результаті дослідження розроблено метод двоетапного адаптивного онбордингу вузлів Mesh-мереж Wi-Fi 7, який за рахунок використання протоколу IEEE 1905.1 та пріоритетзації діапазону 6 ГГц дозволяє повністю нівелювати затримки DFS CAC під час запуску системи. Математично доведено, що запропонований підхід забезпечує стабільність модуляції в умовах перешкод та прискорює ініціалізацію мережі у 2.22–13.1 рази порівняно з традиційними методами. Практична цінність роботи полягає у можливості програмної імплементації алгоритму на базі відкритих систем керування (OpenWrt/prplOS) без залучення дорогої апаратної підтримки режиму STR MLO. Це дозволяє виробникам мережевого обладнання суттєво покращити показники якості досвіду (QoE) для кінцевих користувачів, забезпечуючи безшовне відновлення сервісів та стабільність магістральних каналів у складних архітектурних умовах без збільшення собівартості пристроїв. Подальші дослідження рекомендується зосередити на інтеграції моделей штучного інтелекту для інтелектуального прогнозування змін радіосередовища, що дозволить динамічно коригувати моменти переходу між діапазонами на основі предиктивного аналізу поведінки користувачів та зовнішніх завад

Список літератури:

1. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. Cisco Systems, Inc. 2020. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>.
2. Wi-Fi Alliance. Wi-Fi Certified EasyMesh: Multi-AP Specification v6.0. Wi-Fi Alliance Technology Group. 2023. 184 p. URL: <https://www.wi-fi.org/file/wi-fi-easy-mesh-specification-v6-0>.
3. Liu X., Dong Y., Li Y., Lin Y. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: Feature Summary and Performance Evaluation. arXiv preprint arXiv:2309.15951. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.15951>.
4. Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L. et al. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology. IEEE Communications Magazine. 2019. Vol. 57, Is. 9. P.113–119. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900338>.
5. Qarash S. Wireless Mesh Networks (WMN) in IoT Networks. Journal of Science and Technology. 2024. Vol. 30, No. 1. P. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.20428/jst.v30i1.2572>.
6. Dzhus O., Lobur M. Simulation of the availability and initialization speed of a layer 2 mesh network. CEUR Workshop Proceedings. 2025. Vol. 4145. P. 46–57. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4145/paper4.pdf>.

7. ETSI EN 301 893 V2.1.1. 5 GHz RLAN; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU. European Telecommunications Standards Institute (ETSI). 2017. URL: <https://www.etsi.org/>.
8. Carrascosa-Zamacois M. et al. Understanding Multi-Link Operation in Wi-Fi 7: Performance, Anomalies, and Solutions. 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. (PIMRC). 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/PIMRC56721.2023.10293865>.
9. Cisco Meraki. Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide. Cisco Systems Documentation. 2024. URL: [https://documentation.meraki.com/Wireless/Design_and_Configure/Architecture_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_\(802.11be\)_Technical_Guide](https://documentation.meraki.com/Wireless/Design_and_Configure/Architecture_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_(802.11be)_Technical_Guide).
10. Alauthman A., Shraa T. Performance Evaluation and Latency Optimization of Wi-Fi 7 in High-Density Wireless Environments. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*. 2025. Vol. 14, No. 6. P. 354–364. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijeetc.14.6.354-364>.
11. Lee B. M., Patil M., Hunt P., Khan I. An Easy Network Onboarding Scheme for Internet of Things Networks. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 8763–8772. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2890072>.
12. Brand S. How Wi-Fi 7 adaptive puncturing in DFS channels can maximize mesh performance in the 5GHz band. Qualcomm OnQ Blog. 2023. URL: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2023/03/how-wi-fi-7-adaptive-puncturing-in-dfs-channels-can-maximize-mesh-performance>
13. IEEE Std 1905.1-2013. IEEE Standard for a Convergent Digital Home Network for Heterogeneous Technologies. IEEE Power Line Communications Standards Committee. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6502164>
14. TU-R P.1238-11. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz. Geneva: International Telecommunication Union, 2021. 34 p

Haidar Yu.B. METHOD FOR ACCELERATED ORGANIZATION OF IEEE 802.11be MESH NETWORKS WITH ADAPTIVE BACKHAUL CHANNEL SELECTION

The article addresses the urgent scientific and practical task of increasing the efficiency of deployment and operation of next-generation wireless Mesh networks based on the Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) standard. The primary focus is on mitigating time delays occurring during the initial initialization of backhaul links in the 5 GHz band. It has been established that the mandatory Dynamic Frequency Selection Channel Availability Check (DFS CAC) procedure, which lasts from 60 to 600 seconds, creates critical network downtime periods («dead zones»). This downtime negatively impacts the Quality of Experience (QoE) and the stability of high-bandwidth multimedia services.

A method for accelerated Mesh network organization is proposed and scientifically substantiated, based on the implementation of a two-stage adaptive node onboarding algorithm. Unlike existing solutions that rely on complex hardware implementations of Multi-Link Operation (MLO STR) technology, the developed method utilizes the IEEE 1905.1 abstraction layer for dynamic topology management via a Backhaul Steering mechanism. The core of the method lies in the prioritized use of the 6 GHz (UNII-5) band for instantaneous connection establishment during system startup (Fast Start), while concurrently delegating the preparation of energy-efficient 5 GHz channels to a background operation mode.

The study includes mathematical modeling of link energy parameters based on a logarithmic free-space path loss model. A critical signal level threshold of -67 dBm was determined, at which a proactive switch to the backup band is initiated to maintain highly efficient 64-QAM modulation. It has been established that this approach provides an additional energy gain of 4 dB under conditions of signal attenuation caused by physical obstacles. Computational results demonstrate that the implementation of the proposed algorithm reduces the total initialization time by 2.22 to 13.1 times, depending on the DFS scanning delay. These findings confirm the feasibility of the method for accelerating onboarding and connection recovery following network node reboots. The practical significance of the results lies in the possibility of their implementation on existing wireless hardware without the need for significant hardware cost increases.

Keywords: wireless Mesh networks, Wi-Fi 7, IEEE 1905.1, DFS CAC, Backhaul Steering, adaptive onboarding, 6 GHz band.

Дата першого надходження статті до видання: 25.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026