ВСТУП

Актуальність теми. Стандарт бездротових локальних мереж Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) є подальшим розвитком технології 802.11ac (Wi-Fi 5) і ґрунтується на вже відпрацьованих технічних рішеннях. Водночас у ньому реалізовано низку нових підходів, які значно підвищують ефективність роботи мереж у середовищах з великою кількістю користувачів. Запроваджені технології особливо актуальні для створення Wi-Fi-мереж із високою щільністю підключень, а також дозволяють покращити стабільність та якість з'єднання в умовах інтенсивного радіочастотного навантаження, зокрема в громадському транспорті, торгово-розважальних комплексах, готелях, на стадіонах та в корпоративних мережах.

На сьогодні найбільш доцільним рішенням для доступу до мережі Інтернет і побудови домашньої або офісної Wi-Fi-мережі є застосування дводіапазонного маршрутизатора стандарту 802.11ac разом із мобільними пристроями, що підтримують технологію Wi-Fi 5. Разом із переходом до стандарту Wi-Fi 6 відбувається суттєве зростання теоретичних показників швидкості передавання даних: до 600 Мбіт/с при ширині каналу 80 МГц і використанні одного просторового потоку та до 9607 Мбіт/с за умови 160 МГц і восьми просторових потоків. Для порівняння, стандарт Wi-Fi 5 забезпечує максимальні швидкості на рівні 433 Мбіт/с (80 МГц, один просторовий потік) і 6933 Мбіт/с (160 МГц, вісім просторових потоків).

У стандарті Wi-Fi 6 впроваджено режим OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), призначений для підвищення ефективності використання радіочастотного спектра. Ця технологія була адаптована з мобільних мереж четвертого покоління LTE та фактично є багатокористувацьким розвитком схеми OFDM, що застосовувалася у стандарті Wi-Fi 5.

Технологія OFDMA надає змогу точці доступу одночасно обслуговувати декілька клієнтських пристроїв завдяки поділу радіосигналу на велику кількість піднесних частот, які формують менші логічні підканали. Ці підканали

об’єднуються в ресурсні одиниці (Resource Units, RU), кожна з яких призначається окремому потоку даних. Такий підхід дозволяє паралельно передавати інформацію кільком користувачам Wi-Fi 6 із рівномірним розподілом пропускної здатності, використовуючи один радіоканал без необхідності очікування доступу до нього.

Стандарт Wi-Fi 6 розширює можливості технології MU-MIMO, забезпечуючи її роботу як на передачу даних до клієнтів, так і у зворотному напрямку. Підтримка uplink та downlink MU-MIMO дозволяє точці доступу одночасно взаємодіяти з кількома пристроями. Теоретично Wi-Fi 6 здатний обслуговувати до восьми просторових потоків у кожному з напрямків (конфігурація 8×8), при цьому один користувач може отримувати до чотирьох паралельних потоків даних.

У стандарті Wi-Fi 6 застосовується модуляція 1024-QAM, у якій один сигнальний символ кодується 10 бітами замість 8 біт, що використовувалися в 256-QAM у Wi-Fi 5. Завдяки збільшенню кількості біт на символ зростає обсяг інформації, переданої в одному пакеті, що підвищує пропускну здатність і спектральну ефективність приблизно на чверть.

Коди перевірки на парності з низькою щільністю (LDPC) отримали широке поширення у сучасних бездротових стандартах, зокрема WiMAX та Wi-Fi, завдяки високій ефективності виправлення помилок і можливості паралельної обробки даних. LDPC належать до класу лінійних кодів корекції помилок і описуються розрідженою бінарною матрицею парності, яка у графічному представленні подається у вигляді дводольного графа Таннера.

ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО СТАНДАРТ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ IEEE 802.11ax

1.1Загальна будова систем зв’язку

Бездротові мережі зазнають постійного зростання популярності, що привертає все більшу кількість користувачів. Це, у свою чергу, спричиняє суттєве збільшення обсягу переданих даних у мережах. Значна частина трафіку генерується та споживається саме в приміщеннях, тому рішення для організації внутрішньоприміщеного підключення набувають особливої важливості для забезпечення високої пропускної здатності.

Бездротові мережі WLAN, побудовані на стандарті IEEE 802.11, є одними з найпоширеніших та найефективніших рішень для внутрішніх приміщень. Вони стали ключовою технологією для покриття середніх і великих підприємств, громадських місць, житлових комплексів та інших об’єктів. Такі середовища зазвичай включають кілька невеликих сот із великою кількістю точок доступу, здатних обслуговувати численних користувачів, забезпечуючи при цьому розширене покриття та високу швидкість передачі даних.

За останні роки спостерігається значне зростання впровадження WLAN у обмежених географічних зонах, включаючи декілька перекривних наборів базових послуг (OBSS). Оператори зв’язку обговорюють стратегічну значущість технології Wi-Fi з точки зору очікуваної кількості пристроїв із підтримкою цієї технології та її здатності задовольняти потреби у переданому трафіку. Що стосується світового ринку Wi-Fi, прогнозується, що його вартість зросте до 33,6 млрд доларів США.

Комітет із стандартизації IEEE 802.11 продовжує активно випускати нові проекти поправок, що враховують сучасні технологічні досягнення. На відміну від стільникових технологій, стандарти IEEE 802.11 розробляються з урахуванням

зворотної сумісності, що дозволяє їм ефективно доповнювати одне одного та інтегрувати ключові технічні рішення.

Нещодавно робоча група IEEE 802.11 ухвалила створення нового стандарту WLAN – IEEE 802.11ax. Група TGax наразі займається розробкою розширення стандарту IEEE 802.11ac з метою збільшення загальної пропускної здатності системи, а не лише швидкості передачі даних на рівні каналу. Зокрема, цей стандарт спрямований на підвищення ефективності роботи у сценаріях із високою щільністю пристроїв IEEE 802.11 та обмеженими перешкодами.

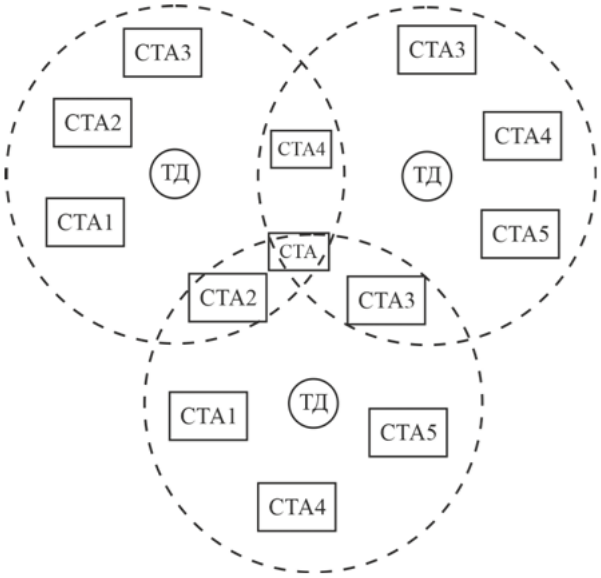
Розглянемо нову поправку до стандарту високоефективного Wi-Fi, IEEE 802.11ax, та обґрунтуємо необхідність її впровадження. Проаналізуємо можливі сценарії використання та зробимо огляд ключових технологічних рішень, які пропонуються для цієї поправки. Особливу увагу приділено двом основним викликам, що постануть перед наступним поколінням мереж Wi-Fi: а) співіснуванню з неліцензованим LTE та б) інтеграції концепції Інтернету речей.

Стандарт IEEE 802.11ax розробляється з метою підвищення ефективності використання радіоспектра та збільшення пропускної здатності в умовах реальних Wi-Fi мереж із великою кількістю підключених користувачів. Обмежена кількість ортогональних каналів для IEEE 802.11 призводить до того, що перекривні базові набори послуг (OBSS) часто стають проблемою в таких мережах.

Механізм запобігання колізіям може призводити до зменшення пропускної здатності мережі та збільшення затримок у передачі даних, оскільки навіть за прийнятного рівня ймовірності колізій середовище ніколи не використовується максимально ефективно. На рис. 1.1 ілюструється проблема перекривних базових наборів послуг (OBSS).

Розглядається сценарій трьох перекривних комірок спільного каналу, кожна з яких містить одну точку доступу та п’ять підключених станцій. При зменшенні площі перекриття середня пропускна здатність у кожній комірці зростає — наприклад, спостерігається понад 400% приріст пропускної здатності, коли площа перекриття між сусідніми комірками скорочується з 38% до 7%. Зменшити

область перекриття можна за допомогою різних методів, передбачених стандартом IEEE 802.11ax.



Хоча сучасні стандарти IEEE 802.11, зокрема 802.11n та 802.11ac, були розроблені для підвищення пікової сумарної пропускної здатності мереж із кількома станціями, проблема ефективного зменшення перешкод поки що не вирішена. Крім того, механізм доступу до каналу у цих стандартах надмірно захищений, що обмежує можливості повторного використання доступного частотного спектра.

Майбутній стандарт IEEE 802.11ax розробляється з метою впровадження методів, які дозволяють підвищити фізичну швидкість передачі даних, зменшити частоту помилок кадрів (FER) та покращити повторне використання спектра. Це досягається за рахунок високоефективного механізму доступу для багатьох користувачів та зменшення рівня завад, що, у свою чергу, сприятиме збільшенню загальної пропускної здатності зони покриття.

Стандарт IEEE 802.11ax розробляється насамперед для забезпечення високоефективної роботи WLAN як у приміщеннях, так і поза ними, з особливим акцентом на підвищення надійності передачі даних у зовнішньому середовищі та по висхідних каналах зв’язку. Цей стандарт спрямований на покращення

показників продуктивності, зокрема середньої пропускної здатності на одну станцію, що безпосередньо підвищує ефективність роботи мережі у порівнянні з багатобазовими розгортаннями BSS (Basic Service Set).

Таким чином, основною метою запропонованих змін є визначення стандартизованих модифікацій фізичного рівня (PHY) та MAC-рівня спадкового стандарту IEEE 802.11, спрямованих на покращення якості обслуговування кінцевих користувачів у щільно розгорнутих мережах WLAN. Сфера застосування цих змін включає підвищення пропускної здатності мережі та окремих користувачів у середовищах із високою концентрацією пристроїв.

Очікується, що запропоновані зміни дозволять збільшити загальну пропускну здатність району щонайменше в чотири рази, одночасно підвищивши середню пропускну здатність на одну станцію приблизно на десять відсотків. Крім підвищення продуктивності для кінцевих користувачів, цей стандарт також орієнтований на поліпшення енергоефективності мережі шляхом впровадження спрощених режимів енергозбереження. Передбачається, що новий стандарт забезпечить методи, які дозволять максимально ефективно використовувати спектральні ресурси.

Стандарт IEEE 802.11ax здебільшого призначений для роботи WLAN у діапазонах частот 2,4 та 5 ГГц, водночас передбачена підтримка роботи в діапазоні від 1 до 6 ГГц. Крім того, очікується, що стандарт забезпечить зворотну сумісність, дозволяючи взаємодіяти з усіма попередніми пристроями стандарту IEEE 802.11.

1.2. Стандарт Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax)

Метою стандарту IEEE 802.11ax є забезпечення можливостей самоконфігурації та самоадаптації мережі для підвищення пропускної здатності зони покриття. У зв’язку з цим група TGax визначила пріоритетність різних сценаріїв використання, які враховуються при розробці та оцінці функціональних можливостей стандарту.

У житлових зонах із високою щільністю OBSS (Overlapping Basic Service Set) виникає, коли велика кількість точок доступу WLAN розташована у безпосередній близькості одна від одної, наприклад, у багатоквартирних будинках. У таких умовах підвищений рівень перешкод, спричинений неконтрольованим і незапланованим розгортанням мереж, може значно погіршувати продуктивність підключених пристроїв.

Подібно до житлових зон, підприємства та організації забезпечують доступ до Інтернету через Wi-Fi у рамках керованої мережі. У таких умовах особливо важливим є ефективне управління перешкодами та реалізація політики «Bring Your Own Device» (BYOD), особливо у сценаріях, коли декілька корпоративних мереж розташовані поруч одна з одною.

Невеликі внутрішні BSS (Basic Service Set) є прикладом середовищ із високою щільністю точок доступу та клієнтських пристроїв, де точки доступу кожного оператора розташовані з регулярною симетрією, наприклад у торгових центрах, аеропортах або на залізничних вокзалах. У таких умовах комірки різних операторів можуть перекриватися, створюючи перешкоди, які здатні знизити продуктивність мережі в зоні покриття.

Великі зовнішні BSS (Basic Service Set) призначені для моделювання зовнішніх розгортань, подібних до мобільних мереж, з високою щільністю користувацьких станцій і значним відстанню між різними точками доступу. У таких умовах потенційні перешкоди від пристроїв, що не є точками доступу, можуть суттєво впливати на роботу кінцевих користувачів і знижувати загальну продуктивність мережі.

Стандарт IEEE 802.11ax розроблений для зменшення впливу змінних перешкод від сусідніх транспортних засобів, а також для дослідження можливих методів зниження обмежень, що впливають на зв’язок транспортних засобів з мережею інфраструктури, зокрема з урахуванням аспектів мобільності та спрямованості сигналу.

Група TGax розглядає як потенційні сценарії використання IEEE 802.11ax такі середовища, як кампуси, промислові майданчики (де на обмеженій території

може зосереджуватися кілька сотень точок доступу), невеликі офіси (один BSS з обмеженою кількістю пристроїв, що зазнають неконтрольованих перешкод), а також середовища для Інтернету речей (IoT). Крім того, стандарт IEEE 802.11ax передбачає застосування LDPC для передачі даних у широкій смузі пропускання (наприклад, при об’єднанні каналів) та BCC для вузькосмугового використання.

1.3. Особливості Wi-Fi: IEEE 802.11ax

Стандарт IEEE 802.11ax, також відомий як Wi-Fi 6, є сучасним поколінням бездротових мереж WLAN, розробленим для підвищення продуктивності та ефективності роботи у середовищах із високою щільністю користувачів. Основні особливості та переваги цього стандарту включають:

1. Підвищена пропускна здатність та ефективність спектра – завдяки впровадженню технологій OFDMA та MU-MIMO, Wi-Fi 6 забезпечує одночасну передачу даних для багатьох користувачів, знижуючи затримки та підвищуючи сумарну пропускну здатність мережі.

2. Покращена продуктивність у щільних середовищах (High-Density Environments) – стандарт оптимізований для роботи в житлових комплексах, офісах, торгових центрах та промислових приміщеннях, де велика кількість точок доступу та користувачів може створювати високий рівень перешкод.

3. Робота у широкому діапазоні частот – Wi-Fi 6 підтримує частоти 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц, що дозволяє гнучко використовувати спектр і забезпечує зворотну сумісність із попередніми стандартами Wi-Fi.

4. Енергоефективність – технологія Target Wake Time (TWT) дозволяє пристроям планувати періоди активності та економити енергію, що особливо важливо для IoT-пристроїв.

5. Підтримка адаптивності та самоорганізації – Wi-Fi 6 забезпечує механізми самоконфігурації та самоадаптації мережі для підвищення стабільності зв’язку та пропускної здатності у змінних умовах середовища.

6. Зменшення впливу завад – стандарт включає методи для мінімізації перешкод від сусідніх мереж, а також від рухомих об’єктів, що особливо актуально для зовнішніх середовищ та транспортних систем.

Завдяки цим особливостям IEEE 802.11ax є оптимальним рішенням для побудови високопродуктивних бездротових мереж у сучасних умовах, забезпечуючи стабільний доступ до Інтернету для великої кількості користувачів і пристроїв одночасно.

Для покращення взаємодії з користувачами шляхом зменшення рівня завад та підвищення сумарної пропускної здатності кількох станцій розробляється модифікація стандарту IEEE 802.11ax. Мета цієї поправки полягає у значному підвищенні ефективності WLAN та продуктивності систем у умовах щільного розгортання мереж. Група TGax планує впровадити радіотехнології, засновані на MIMO та OFDMA, що дозволить передавати більше бітів за один час передачі (TXOP).

Розглянемо ключові функції, запропоновані для вдосконалення стандарту IEEE 802.11ax. Пропозиції поділяються на чотири основні категорії: PHY-рівень**,** MAC-рівень**,** режим, розрахований на багато користувачів, та інші помітні функції. Для кожної з цих категорій виділено очікувані поліпшення, насамперед у плані пропускної здатності системи, при цьому найбільший приріст забезпечують методи, орієнтовані на багатокористувацькі сценарії. Варто зазначити, що очікуваний відсоток покращення для кожної пропозиції базується на дослідженнях, представлених і обговорених у рамках TGax.

Хоча IEEE 802.11ax є розвитком стандарту IEEE 802.11ac, він орієнтований на впровадження нових технологій із збереженням зворотної сумісності. Зокрема, у PPDU IEEE 802.11ax планується використання застарілої преамбули, дубльованої на кожному 20 МГц підканалі, щоб забезпечити співіснування зі старими пристроями. Крім того, TGax розглядає можливість створення нових типів преамбул, необхідних для підтримки сучасних функцій стандарту. Основні фізичні модифікації, запропоновані для IEEE 802.11ax, можна охарактеризувати наступним чином.

1) Рішення щодо фізичного кодування (LDPC та BCC)

Схема корекції помилок **(**FEC), яка застосовувалася за замовчуванням у стандартах IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac, базується на двійковому згортковому кодуванні (BCC) із частотним перемежуванням для кожного символу при мультиплексуванні OFDM. Використання кодів з низькою щільністю перевірки парності (LDPC) поки не є обов'язковим і рідко застосовується у WLAN через високі обчислювальні витрати. Проте дослідження показують, що LDPC-коди можуть забезпечувати значне підвищення пропускної здатності мережі у порівнянні з BCC.

2) 1024-QAM

Одним із запропонованих TGax рішень для досягнення чотириразового збільшення середньої пропускної здатності є застосування високорівневої схеми модуляції 1024-QAM, при якій кожен символ кодує більшу кількість бітів даних завдяки розширеному констеляційному діаграмному представленню.

3) Поліпшення для зовнішнього зв'язку

Щоб підвищити спектральну ефективність станцій у передбачуваних сценаріях використання, TGax планує збільшити розмір FFT у чотири рази порівняно з IEEE 802.11ac**.** Більший розмір ШПФ забезпечує підвищену надійність роботи на відкритому повітрі та сприяє покращенню середньої пропускної здатності у внутрішніх приміщеннях.

Для зменшення значних втрат сигналу та затримок каналу, що виникають у великих точках доступу на відкритому повітрі, TGax запропонував новий формат блоку даних протоколу HE-PPDU фізичного рівня (PLCP), який називається PPDU з розширеним діапазоном для одного користувача (SU). У цьому форматі поля, що містять інформацію для коректної інтерпретації пакетів, дублюються для підвищення надійності передачі.

4) Частотно-вибіркове планування (FSS)

Системи OFDMA отримують переваги від частотної вибірковості завдяки використанню частотно-вибіркового планування (FSS). У рамках TGax FSS активно застосовується для підвищення пропускної здатності віддалених станцій

порівняно з TD-сценаріями шляхом виділення блоків фізичних ресурсів із мінімальною кількістю завад для їх передачі.

Крім того, стандарт IEEE 802.11ax передбачає використання двопідносійної модуляції, при якій одна й та сама інформація передається одночасно на двох віддалених піднесучих. Це рішення спрямоване на підвищення продуктивності FER та поліпшення стійкості до вузькосмугових завад у умовах щільного розгортання мережі.

TGax активно розробляє ряд удосконалень для MAC-рівня, спрямованих на підвищення ефективності та продуктивності роботи мережі:

Покращення MAC-рівня у IEEE 802.11ax

1. OFDMA для багатокористувацьких сценаріїв
MAC-рівень Wi-Fi 6 підтримує OFDMA, що дозволяє одночасну передачу даних для кількох користувачів у межах одного каналу. Це зменшує затримки, підвищує сумарну пропускну здатність та покращує ефективність використання спектра, особливо у щільно розгорнутих мережах.

2. Target Wake Time (TWT)
Ця функція дозволяє пристроям планувати періоди пробудження та сну, що значно зменшує енергоспоживання, особливо для IoT-пристроїв. TWT також знижує ймовірність колізій у середовищах із великою кількістю користувачів.

3. Багатокористувацьке MIMO (MU-MIMO) на зворотній лінії
Wi-Fi 6 розширює використання MU-MIMO не лише на пряму лінію, а й на зворотний канал, дозволяючи одночасну передачу даних від кількох клієнтів до точки доступу. Це підвищує ефективність у багатокористувацьких сценаріях.

4. Покращене планування доступу до каналу (BSS Coloring**)**
MAC-рівень впроваджує BSS Coloring, що дозволяє точкам доступу розрізняти власні та сторонні BSS. Це зменшує конфлікти між сусідніми мережами і покращує ефективність використання спектра у щільно розташованих середовищах.

5. Покращена підтримка QoS
Стандарт забезпечує більш точне управління пріоритетами трафіку для різних

типів послуг (мультимедіа, VoIP, відео, IoT), що дозволяє підтримувати гарантований рівень обслуговування навіть при високому навантаженні мережі.

6. Зменшення колізій та затримок MAC IEEE 802.11ax включає оптимізацію таймінгів і процедур доступу до каналу для зменшення затримок та ймовірності колізій, особливо у середовищах із високою щільністю користувачів та точок доступу.

7. Покращена сумісність із попередніми стандартами Удосконалення MAC забезпечують зворотну сумісність з пристроями попередніх версій Wi-Fi (802.11a/b/g/n/ac), що дозволяє безперервну роботу змішаних мереж без значного зниження продуктивності.

Нижче наведено огляд багатокористувацьких методів, запропонованих TGax, для підвищення ефективності та продуктивності мереж Wi-Fi 6.

1) OFDMA для низхідної та висхідної лінії зв’язку

OFDMA, що працює поверх OFDM, дозволяє базовій станції виділяти підмножину піднесучих для кожного користувача, забезпечуючи одночасну передачу даних для кількох пристроїв. Завдяки синхронному доступу до каналу зменшується кількість колізій і конфліктів. У стандарті IEEE 802.11ax OFDMA реалізована як для низхідної, так і для висхідної лінії, при цьому мінімальна одиниця ресурсу (RU) складається з 26 піднесучих. У щільно населених середовищах виділення спеціальних підканалів для кожної станції дозволяє ефективніше використовувати ресурси та підвищує середню пропускну здатність кінцевого користувача.

Для підтримки роботи OFDMA стандарт IEEE 802.11ax вводить спеціальний формат HE-PPDU, відомий як PPDU на основі тригера HE, який дозволяє координувати планування ресурсів у мережі. Це рішення значно спрощує процес синхронізації між станціями. Процес виділення каналів, що включає методи призначення доступних RU для низхідної та висхідної ліній зв’язку, здійснюється під контролем точки доступу (AP).

У висхідній лінії зв’язку IEEE 802.11ax впроваджує механізм розподіленого довільного доступу на основі OFDMA, при якому блоки ресурсів, виділені точкою

доступу для передачі PPDU, обираються випадковим чином. Фрейм тригера містить параметри, що дозволяють ініціювати довільний доступ у висхідній лінії зв’язку, забезпечуючи ефективну координацію передачі даних між користувачами.

2) Багатокористувацьке (MU) MIMO для низхідної та висхідної лінії зв’язку

У MU-MIMO передача даних для кількох станцій може відбуватися одночасно в тих самих частотно-часових ресурсах. Це означає, що кілька користувачів одночасно взаємодіють з базовою станцією, яка оснащена кількома антенами, використовуючи просторове рознесення каналів зв’язку. Такий підхід дозволяє ефективно підвищувати пропускну здатність і зменшувати затримки при одночасному обслуговуванні декількох користувачів.

TGax планує впровадити MU-MIMO для висхідної лінії зв’язку, доповнюючи вже реалізовану MU-MIMO на низхідній лінії. У цьому режимі кільком станціям дозволяється одночасно передавати дані на приймач, використовуючи ті ж самі частотні ресурси. Аналогічно OFDMA, для координації передачі застосовується PPDU на основі тригера, який вказує станціям, коли саме слід передавати дані по MU-MIMO у висхідній лінії.

3) Багатокористувацька агрегація фреймів

Агрегація фреймів була впроваджена в IEEE 802.11n для зменшення накладних витрат, дозволяючи передавати кілька фреймів даних за один доступ до каналу, якщо вони мають однаковий пункт призначення. TGax розширює цю концепцію, запроваджуючи багатокористувацьку агрегацію, яка дає змогу одночасно відправляти фрейми для кількох одержувачів. Це значно скорочує накладні витрати на передачу та підвищує ефективність використання каналу в щільно розгорнутих мережах.

4) Механізми енергозбереження

Для зменшення енергоспоживання TGax удосконалює існуючі стани сну та впроваджує нові методи енергозбереження, які дозволяють або подовжити періоди сну, або скоротити час активності пристроїв. Ці підходи особливо ефективні у мережах з високою щільністю та при роботі пристроїв з низьким

енергоспоживанням, забезпечуючи оптимальне використання енергетичних ресурсів без шкоди продуктивності мережі.

Крім того, TGax розглядає можливість адаптації методів енергоефективності, запропонованих для стандарту IEEE 802.11ah, зокрема Target Wake Time (TWT). Цей підхід дозволяє базовій станції визначати графік сну та активності для підключених станцій, що забезпечує більш ефективне управління енергоспоживанням у щільно населених мережах.

1.4. Проблеми які пов’язані з використанням Wi-Fi

Попри значний розвиток стандартів Wi-Fi, існує низка проблем, які можуть обмежувати ефективність бездротових мереж:

1. Перешкоди та завади. У щільно населених середовищах, таких як багатоквартирні будинки, офіси чи торгові центри, численні точки доступу можуть створювати високий рівень завад, що негативно впливає на продуктивність і стабільність з’єднання.

2. Обмежена пропускна здатність у пікові моменти
Коли багато пристроїв одночасно підключено до однієї точки доступу, пропускна здатність мережі може знижуватися, що призводить до затримок та зниження якості обслуговування.

3. Проблеми сумісності. Застарілі пристрої та різні версії стандартів Wi-Fi можуть обмежувати використання новітніх функцій і технологій, зменшуючи загальну ефективність мережі.

4. Енергоспоживання**.** Особливо у пристроїв IoT або мобільних станцій, високий рівень активності та часті передачі даних можуть призводити до швидкого витрачання енергії, що потребує додаткових механізмів оптимізації енергоспоживання.

5. Безпека та захист даних. Відкриті та погано захищені мережі Wi-Fi залишаються вразливими до атак, що може призводити до несанкціонованого доступу та витоку інформації.

6. Вплив навколишнього середовища. Фізичні перешкоди, такі як стіни, меблі чи електроприлади, можуть знижувати якість сигналу і обмежувати радіус покриття бездротової мережі.

Таким чином, для забезпечення стабільної, швидкої та безпечної роботи Wi-Fi необхідно впроваджувати сучасні методи управління ресурсами, зменшення завад та оптимізації енергоспоживання.

Оскільки IEEE 802.11ax планується використовувати спільно з передовими бездротовими стільниковими технологіями, такими як LTE та його покращена версія LTE-A, слід звернути увагу на можливі проблеми співіснування мереж. Крім того, поправки до стандарту IEEE 802.11ax розглядаються як перспективне рішення для створення комунікаційних мереж, здатних ефективно підтримувати пристрої та сервіси Інтернету речей (IoT).

Окрім мереж Wi-Fi, інші технології широкосмугового доступу починають активно розглядати можливості роботи в неліцензованому спектрі. Зокрема, LTE у неліцензійних діапазонах оцінювався робочими групами LTE-U та 3GPP як рішення для протидії стрімкому зростанню обсягів передаваного трафіку.

Застарілий стандарт IEEE 802.11 використовує метод прослуховування перед передачею (Listen Before Talk, LBT), що базується на PHY Clear Channel Assessment (PHYCCA), для визначення можливості передачі фрейму даних. PHYCCA включає два основні підходи: вимірювання фізичної несучої (PHYCS) та виявлення фізичної енергії (PHYED).

Метод PHYCS дозволяє виявляти та декодувати преамбулу фреймів інших станцій Wi-Fi. Якщо рівень енергії виявленої преамбули перевищує поріг CST, канал вважається зайнятим. PHYED, вперше застосований у IEEE 802.11a для протидії шуму передавачів OFDM, а пізніше розширений для виявлення будь-яких сигналів у загальному каналі, визначає наявність енергії в каналі незалежно від її джерела.

На відміну від Wi-Fi, де станції застосовують розподілений механізм доступу до бездротового середовища, LTE покладається на базові станції, які виконують роль центральних планувальників, координуючи доступ усіх користувачів до радіоканалу.

Для прискорення виходу на ринок першої хвилі LTE-пристроїв, сумісних із діапазоном 5 ГГц, початкова архітектура LTE-U була спроектована з метою мінімального втручання у існуючі специфікації та використовує механізм Listen Before Talk (LBT) для координації доступу до каналу.

Замість цього LTE-U застосовує динамічну схему адаптивної передачі з визначенням несучої (CSAT). CSAT дозволяє планувати інтервали передач LTE-U відповідно до робочого циклу, при якому періоди відключення обираються на основі зафіксованої активності каналу.

Ранні дослідження співіснування Wi-Fi та LTE у неліцензованому діапазоні показали суперечливі результати: одні експерименти свідчать, що відсутність LBT у LTE-U створює проблеми співіснування, тоді як інші демонструють мінімальний або зовсім відсутній вплив. Водночас, правила Європейського інституту телекомунікаційних стандартів (ETSI) EN 301 893 зобов’язують використовувати LBT у діапазоні ISM 5 ГГц на всій території Європи.

Неліцензований варіант LTE за стандартами 3GPP відомий як LAA-LTE (Licensed Assisted Access). Головна мета LAA-LTE – створити глобально гармонізовані специфікації LTE, які забезпечують справедливе співіснування з Wi-Fi (IEEE 802.11). Для цього використовується механізм доступу до середовища, схожий на розширений розподілений доступ (EDCA) у стандарті IEEE 802.11, який поєднує виявлення несучої (Carrier Sensing) і пріоритетне відстрочене передавання.

Можна зазначити, що LAA-LTE і IEEE 802.11 застосовують подібні механізми доступу до каналу, тому вони конкурують у порівнянних умовах. Натомість LTE-U використовує інший підхід, який не завжди відповідає вимогам різних регуляторних областей. Водночас, з урахуванням майбутніх специфікацій

LTE-U, що передбачають поєднання LBT та CSAT, буде необхідним повторне дослідження співіснування IEEE 802.11ax і LTE-U.

Отже, впровадження LTE як технології з централізованим плануванням змінює динаміку використання неліцензованого спектра. Відмінності між LTE та Wi-Fi призводять до відсутності спільного каналу керування для цих технологій. У той же час, нові функції, передбачені стандартом IEEE 802.11ax, спрямовані на зменшення впливу завад та покращення ефективності роботи мережі.

Попри проблему співіснування, розробка безшовних механізмів, що дозволяють LTE і Wi-Fi ефективно взаємодіяти, може значно покращити користувацький досвід. Одним із таких рішень, запропонованих 3GPP, є агрегування каналів LTE та Wi-Fi (LWA). На відміну від LTE-U та LAA-LTE, LWA не створює нового механізму співіснування, а визначає структуру взаємодії між технологіями. Головна перевага LWA полягає в можливості його реалізації через оновлення програмного забезпечення, що дозволяє одночасну передачу даних через інтерфейси Wi-Fi та LTE, використовуючи спеціальні протоколи, зокрема MPTCP (Multipath TCP).

Ключовим елементом інфраструктури Інтернету речей (IoT) є бездротова система зв’язку, яка виступає своєрідним мостом для передачі даних і керуючих сигналів. Проте сучасні стільникові технології мають обмежену здатність ефективно обробляти великі обсяги даних від численних енергонезалежних пристроїв, розташованих на великій території. У цьому контексті WLAN на основі стандартів IEEE може стати перспективною альтернативою для IoT завдяки простоті розгортання та економічній ефективності. Однак для цього необхідно вирішити проблеми високого енергоспоживання, обмеженого радіусу дії, кількості підключених пристроїв та загальної ефективності системи.

Що стосується сучасних удосконалень стандарту IEEE 802.11, поправка IEEE 802.11ah [11], розроблена для роботи в діапазоні частот нижче 1 ГГц, орієнтована на застосування в системах Інтернету речей. Основні переваги цього стандарту включають підвищену енергоефективність (завдяки механізмам TWT та подовженим періодам очікування), покращене покриття завдяки нижчій частоті

та більш надійним методам модуляції та кодування, а також здатність одночасно обслуговувати до 8000 підключених пристроїв.

Затримки у впровадженні стандарту IEEE 802.11ah можуть створити ситуацію, коли після виходу на ринок він зіткнеться з серйозною конкуренцією з боку вже існуючих або перспективних технологій, що використовуються для реалізації рішень Інтернету речей.

Вищезгадана проблема спонукала TGax розглядати нові рішення для сценаріїв використання Інтернету речей. Нещодавно робоча група IEEE 802.11 заснувала спеціальну групу за інтересами Long Range Low Power (LRLP), яка зосереджена на потребах міжмашинної взаємодії (M2M), Інтернету речей, управління енергоспоживанням та сенсорних додатків. Метою цієї групи є розробка технологій, що забезпечують роботу Wi-Fi на більших відстанях у діапазоні 2,4 ГГц. Водночас нова технологія створює додаткові виклики щодо співіснування для наступного покоління WLAN. У рамках LRLP та TGax розглядали два основні підходи: і) впровадження вузькосмугової передачі з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA) з меншим рознесенням піднесучих, та іі) реалізація LRLP-передачі у вигляді модуляції однієї несучої у новій схемі.

1.5 Wi-Fi 5 (стандарт IEEE 802.11ac) та Wi-Fi 6 (стандарт IEEE 802.11ax) порівняння сигналів

Wi-Fi 5 (стандарт IEEE 802.11ac) та Wi-Fi 6 (стандарт IEEE 802.11ax) відрізняються як за технічними характеристиками, так і за ефективністю роботи в різних середовищах. Основні відмінності можна виділити наступним чином:

1. Пропускна здатність та продуктивність:

- Wi-Fi 5 забезпечує теоретичну максимальну швидкість передачі до 3,5 Гбіт/с на частоті 5 ГГц, використовуючи технології MU-MIMO тільки на низхідній лінії.

- Wi-Fi 6 значно підвищує продуктивність завдяки впровадженню OFDMA, MU-MIMO у висхідній та низхідній лініях, а також 1024-QAM модуляції. Це дозволяє збільшити ефективну пропускну здатність у щільних середовищах та підвищити середню швидкість для кожної станції.

2. Робота в умовах високої щільності:

- Wi-Fi 5 здатний ефективно обслуговувати невелику кількість пристроїв, проте у багатокористувацьких середовищах (торгові центри, офіси, кампуси) його ефективність значно знижується через завади та конкуренцію за канал.
- Wi-Fi 6 оптимізований для щільного розгортання мереж, використовуючи механізми OFDMA та BSS Coloring, що дозволяє зменшити завади та підвищити продуктивність у багатокористувацьких середовищах.

3. Енергоефективність:

- Wi-Fi 5 не має спеціальних механізмів для управління енергоспоживанням окремих пристроїв.
- Wi-Fi 6 реалізує функцію Target Wake Time (TWT), що дозволяє пристроям планувати періоди пробудження та сну, зменшуючи споживання енергії та продовжуючи час роботи від батареї.

4. Сумісність та діапазон частот:

- Wi-Fi 5 працює виключно на частоті 5 ГГц і зберігає обмежену зворотну сумісність із попередніми стандартами.
- Wi-Fi 6 підтримує роботу на 2,4 ГГц та 5 ГГц, а також частково на діапазоні 6 ГГц, зберігаючи сумісність із застарілими пристроями IEEE 802.11a/b/g/n/ac.

5. Стійкість до завад:

- Wi-Fi 5 менш ефективний у боротьбі з завадами від сусідніх мереж та пристроїв.
- Wi-Fi 6 включає механізми частотного планування та просторового рознесення, що дозволяє покращити якість сигналу та зменшити кількість втрат пакетів, особливо у щільно населених зонах.

Таким чином, Wi-Fi 6 є еволюційним покращенням Wi-Fi 5, яке забезпечує вищу продуктивність, кращу стійкість до завад, ефективніше використання спектру та зниження енергоспоживання у сучасних мережах з великою кількістю підключених пристроїв.

Символ OFDM у стандарті Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) має наступні часові параметри, які забезпечують ефективну передачу даних та стійкість до міжсимвольних завад:

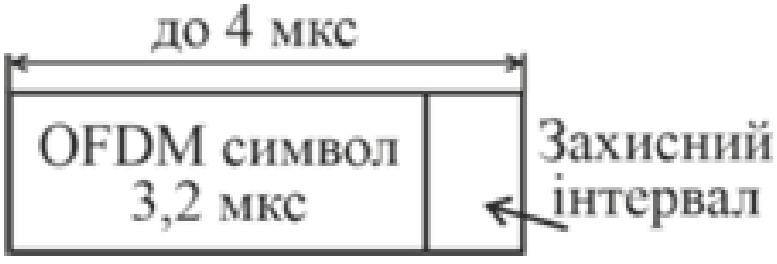
1. Тривалість корисного сигналу (Data Symbol Duration, TdataT_\text{data}Tdata) – це час передачі основної інформації одного OFDM-символу без урахування захисного інтервалу.

2. Захисний інтервал (Cyclic Prefix, TCPT_\text{CP}TCP) – короткий часовий проміжок, доданий на початок символу для запобігання інтерсимвольним завадам (ISI), що виникають через багатошляховість.

3. Загальна тривалість символу OFDM (Symbol Duration, TOFDMT_\text{OFDM}TOFDM) визначається як сума тривалості корисного сигналу та циклічного префіксу: TOFDM=Tdata+TCPT_\text{OFDM} = T_\text{data} + T_\text{CP}TOFDM=Tdata+TCP

Для Wi-Fi 5 стандартним є Tdata=3,2 μcT_\text{data} = 3,2\ \mu\text{c}Tdata =3,2 μc та TCP=0,8 μcT_\text{CP} = 0,8\ \mu\text{c}TCP=0,8 μc, що дає загальну тривалість символу TOFDM=4 μcT_\text{OFDM} = 4\ \mu\text{c}TOFDM=4 μc.

На рис. 1.2 наведено схематичне представлення структури OFDM-символу для Wi-Fi 5, де відображено корисний сигнал та циклічний префікс.



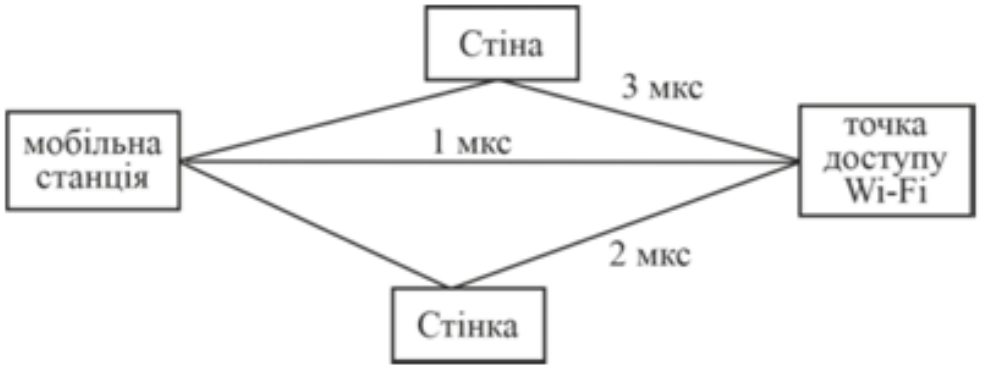
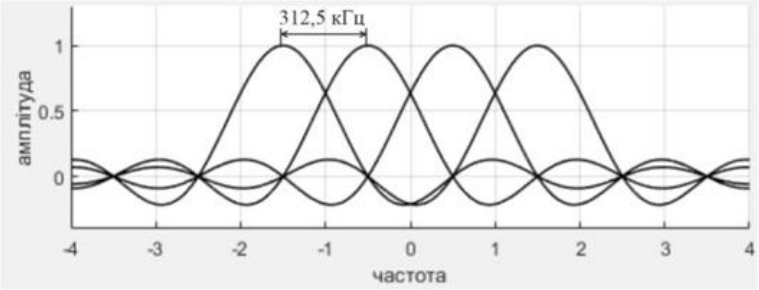


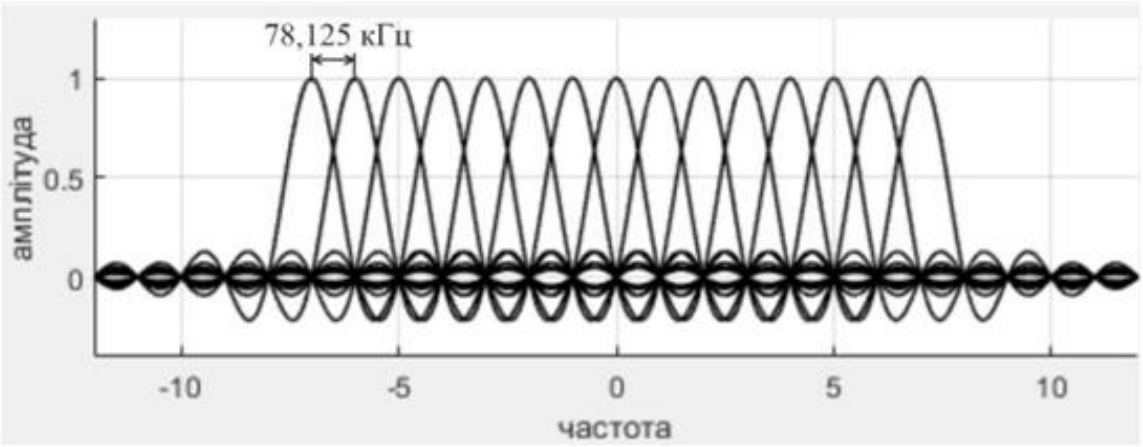
Рис. 1.3 Внутрішні багатоканальні відбиття

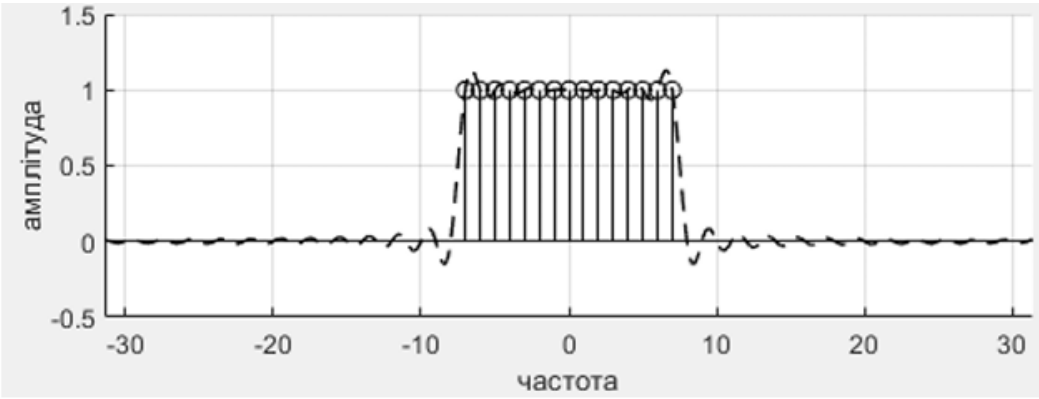
Відстань між підносійними OFDM у стандарті Wi-Fi 5, рис. 1.4.



Для стандарту IEEE 802.11n/ac, відстань між підносійними складає 312,5 кГц, а для стандарту IEEE 802.11ax - складає 78,125 кГц. Тривалість символу для Wi-Fi 6 до 16 мкс, як показано на рис. 1.5.







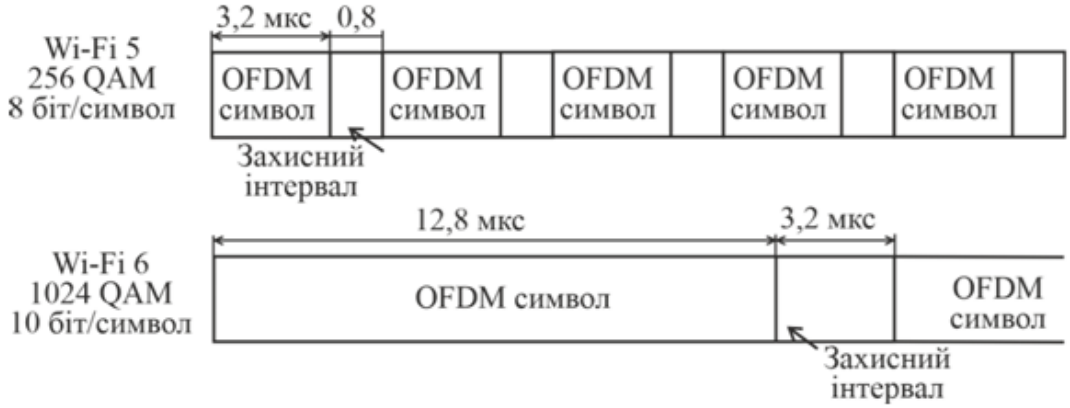
У стандарті OFDMA канал ділиться на менші підканали, які називаються ресурсними одиницями (Resource Units, RU). Кожна RU містить певну кількість підносіїв (subcarriers), що дозволяє одночасно обслуговувати кілька користувачів у межах одного частотного каналу.

Ця організація дає змогу:

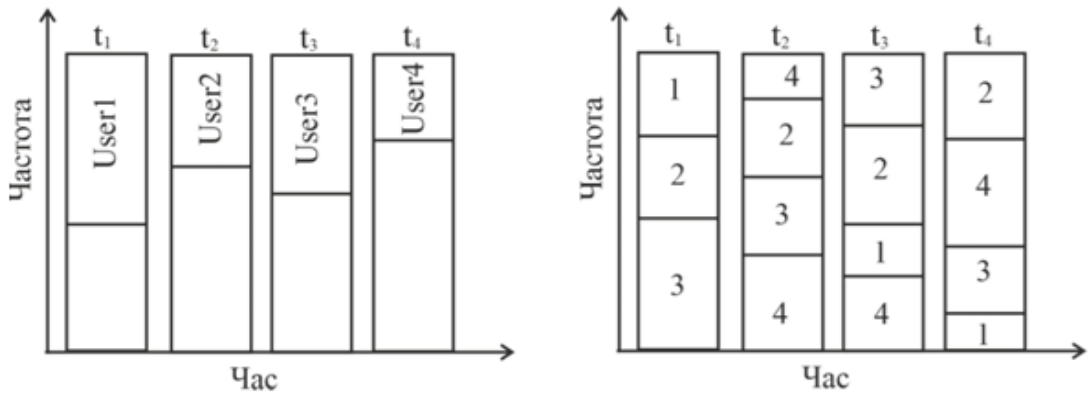
- виділяти окремі підканали різним станціям для одночасної передачі даних;
- зменшувати конфлікти доступу до середовища порівняно з традиційним OFDM;
- ефективніше використовувати спектр у щільних мережах Wi-Fi.



В області часу послідовність OFDM символів показана на рис. 1.9.



За стандартом для модуляції16QAM значення величини вектора помилки EVM= -19 дБ; для 64QAM: EVM= -27 дБ; для 256QAM: EVM= -32 дБ; для 1024QAM: EVM= -35 дБ. Різниця між OFDM та OFDMA (рис. 1.10).



Wi-Fi 6 також підтримує технологію UL MU-MIMO, при якій дані передаються в декількох просторових потоках (рис. 1.10).

Проведено всебічний аналіз стандарту IEEE 802.11ax — майбутньої високоефективної версії Wi-Fi, розробленої для підвищення пропускної здатності у середовищах із високою щільністю користувачів та у відкритих просторах. Після визначення потреби та обсягу запропонованих змін, було висвітлено ключові технологічні вдосконалення, які стануть основою наступного покоління WLAN. Окремо підкреслено потенційні проблеми співіснування IEEE 802.11ax із технологією LTE-U, а також розглянуто очікувані можливості та виклики для TGax у контексті застосування у сценаріях Інтернету речей (IoT).

2. ПОБУДОВА КОДЕРА І ДЕКОДЕРА LDPC

2.1 Загальні відомості про коди LDPC

Коди з перевіркою парності низької щільності (Low-Density Parity-Check, LDPC) — це клас лінійних блочних кодів виправлення помилок, які характеризуються рідкою (низькощільною) матрицею перевірки парності HHH. Вперше ці коди були запропоновані Робертом Галлагером у 1960 році [1] та пізніше відроджені Маккеєм у 1990-х роках [2]. LDPC-коди відзначаються високою ефективністю та здатністю досягати продуктивності, близької до теоретичного межового показника Шеннона для каналу з шумом.

Основні особливості LDPC-кодів:

1. Низька щільність матриці HHH — більшість елементів матриці дорівнюють нулю, що забезпечує малу обчислювальну складність при кодуванні та декодуванні.
2. Гнучкість параметрів коду — довжина кодових слів та кількість контрольних бітів можуть змінюватися залежно від вимог до пропускної здатності та надійності.
3. Висока ефективність у шумних каналах — LDPC-коди добре підходять для середовищ із високим рівнем завад, таких як бездротові мережі Wi-Fi, LTE, 5G та супутниковий зв’язок.
4. Можливість апаратної реалізації — завдяки низькій щільності матриці коди LDPC ефективно реалізуються в FPGA та ASIC, що дозволяє їх використовувати у високошвидкісних системах.

LDPC-коди представляють інформаційне слово у вигляді векторів бітів, до яких додаються контрольні біти відповідно до матриці парності HHH. Для декодування застосовуються ітеративні алгоритми, такі як алгоритм суматор-продукт (Sum-Product Algorithm, SPA) або спрощений алгоритм мінімального обміну (Min-Sum Algorithm, MSA).

Завдяки своїй структурі та ефективності LDPC-коди стали стандартом у багатьох сучасних бездротових і провідних системах зв’язку, зокрема:

- Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) — забезпечує високу пропускну здатність і надійність передачі в щільних мережах;
- LTE та 5G NR — для швидкої передачі даних у мобільних мережах;
- Супутникові та кабельні системи зв’язку — для зменшення впливу шумів на довгих каналах передачі.

Таким чином, LDPC-коди є універсальним інструментом забезпечення надійності та високої продуктивності сучасних комунікаційних мереж.

2.2 Будова кодів LDPC

Коди LDPC є лінійними блочними кодами, що ґрунтуються на низькощільній матриці перевірки парності HHH. Основна ідея полягає в тому, що інформаційне слово доповнюється контрольними бітами таким чином, щоб усі бітові комбінації задовольняли систему лінійних рівнянь: H·cT=0H \cdot c^T = 0H·cT=0

де:

- HHH — матриця перевірки парності розміром m×nm \times nm×n, де nnn — довжина кодового слова, mmm — кількість контрольних бітів;
- ccc — кодове слово (вектор бітів довжини nnn);
- T^TT — операція транспонування.

Основні елементи структури LDPC-кодів

1. Матриця перевірки парності HHH

- Має невелику кількість ненульових елементів у кожному рядку та стовпці, що забезпечує низьку щільність.
- Вона визначає, які біти залежать один від одного, і задає зв’язок між інформаційними та контрольними бітами.

2. Матриця генератора GGG

- Використовується для кодування інформаційного слова.

- Зв’язок між матрицями: G·HT=0G \cdot H^T = 0G·HT=0.
- Кодування відбувається шляхом множення інформаційного слова на матрицю генератора: c=u·Gc = u \cdot Gc=u·G, де uuu — інформаційне слово.

3. Графічне подання (біпартитний граф)

- LDPC-коди часто зображують у вигляді біпартитного графа, де:

1. Вузли змінних (Variable Nodes, VN) відповідають бітам кодового слова;
2. Вузли перевірки (Check Nodes, CN) відповідають рядкам матриці HHH;
3. Ребра з’єднують вузли змінних і вузли перевірки там, де відповідний елемент Hi,j=1H_{i,j} = 1Hi,j=1.

- Така структура спрощує ітеративне декодування і дозволяє візуально аналізувати зв’язки між бітами.

Види LDPC-кодів:

1. Регулярні LDPC-коди

- Кожен рядок і кожен стовпець матриці HHH має однакову кількість ненульових елементів.
- Простота конструкції, але продуктивність обмежена на коротких та середніх довжинах кодових слів.

2. Нерегулярні LDPC-коди

- Кількість ненульових елементів у рядках та стовпцях різна.
- Забезпечують кращу продуктивність, особливо на коротких кодових словах, і частіше використовуються у сучасних стандартах (Wi-Fi 6, LTE, 5G NR).

Основні параметри LDPC-коду

- Довжина кодового слова nnn — кількість бітів у кодовому слові.
- Кількість інформаційних бітів kkk — кількість корисних бітів у слові.
- Розмірність коду m=n−km = n-km=n−k — кількість контрольних бітів.
- Коефіцієнт кодування R=k/nR = k/nR=k/n — визначає ефективність передачі інформації.

Таким чином, будова LDPC-кодів поєднує матричне подання, біпартитний граф та низьку щільність зв’язків, що забезпечує ефективне кодування та ітеративне декодування з високою продуктивністю та низьким рівнем помилок.

Матриця перевірки парності (Parity Check Matrix, H) є ключовим елементом LDPC-коду та визначає такі характеристики коду:

- BER (Bit Error Rate) — рівень помилок бітів;
- Пропускна здатність — швидкість передачі даних;
- Складність декодування — обчислювальні ресурси, необхідні для ітеративного декодування.

У стандарті IEEE 802.11n використовуються матриці перевірки парності з багаторівневою структурою. Вони формуються з зсунутих одиничних матриць, об’єднаних у різні комбінації для підтримки декількох довжин кодових блоків та швидкостей кодування.

Для прикладу:

- Використовуються 12 різних матриць для довжин блоків 648, 1296 і 1944 бітів;
- Підтримуються кодові швидкості: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6.

Матриця перевірки парності розміром 324×648, призначена для блоку довжиною 648 біт і швидкості коду 1/2, показана на рис. 2.1.

- Рівень матриці складається з кількох рядків, а конкатенація рівнів формує повну матрицю перевірки парності.
- Наприклад, матриця перевірки парності швидкості 1/2 має 12 рівнів, кожен із яких складається з 24 підматриць розміром 27×27.
- Підматриці можуть бути або нульовими матрицями, або зсунутими одиничними матрицями, що забезпечує регулярну структуру та ефективність кодування.

Такий підхід дозволяє стандартизувати LDPC-коди для різних швидкостей та довжин блоків, одночасно зберігаючи ефективність декодування та високу продуктивність при низькому рівні помилок.

```
P=[0 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 0 -1 -1 0 1 0 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1
  22 0 -1 -1 17 -1 0 0 12 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1
  6 -1 0 -1 10 -1 -1 -1 24 -1 0 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1
  2 -1 -1 0 20 -1 -1 -1 25 0 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1
 23 -1 -1 -1 3 -1 -1 -1 0 -1 9 11 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 -1 -1 -1
 24 -1 23 1 17 -1 3 -1 10 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 -1 -1
 25 -1 -1 -1 8 -1 -1 -1 7 18 -1 -1 0 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 -1
 13 24 -1 -1 0 -1 8 -1 6 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1
 7 20 -1 16 22 10 -1 -1 23 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1
 11 -1 -1 -1 19 -1 -1 -1 13 -1 3 17 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -1
 25 -1 8 -1 23 18 -1 14 9 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0
 3 -1 -1 -1 16 -1 -1 2 25 5 -1 -1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0]
```

2.3Декодер кодів LDPC

Декодер LDPC призначений для виявлення та виправлення помилок, що виникають у бітових потоках під час передачі даних через канал зв’язку. Основна мета декодування — відновлення початкової інформації з максимальною точністю при мінімальному обчислювальному навантаженні.

Принцип роботи декодера

Декодування LDPC-кодів ґрунтується на ітеративному обміні повідомленнями між бітовими вузлами (variable nodes) і вузлами перевірки парності (check nodes), які формують біпартитний граф на основі матриці перевірки парності H.

Основні етапи роботи декодера:

1. Ініціалізація — прийняті значення бітів коду (log-likelihood ratios, LLR) подаються на вузли змінних;
2. Передача повідомлень від вузлів перевірки парності до вузлів змінних — розраховуються ймовірності помилок для кожного біта;
3. Передача повідомлень від вузлів змінних до вузлів перевірки парності — оновлюються оцінки бітів з урахуванням отриманих повідомлень;
4. Перевірка умов парності — якщо всі перевірки парності виконані, декодування завершено;
5. Ітераційний процес — кроки 2–4 повторюються, поки не буде досягнуто максимуму ітерацій або всі умови парності не будуть виконані.

Основні алгоритми декодування. Найбільш поширені алгоритми декодування LDPC:

- Алгоритм Белліфа (Belief Propagation, BP) — точний, але обчислювально затратний;
- Алгоритм Sum-Product — варіант BP, використовує логарифмічні ймовірності для зменшення обчислень;
- Алгоритм Min-Sum — спрощений алгоритм для зниження складності, при цьому трохи втрачається точність;
- Алгоритм Offset Min-Sum — модифікація Min-Sum, яка компенсує похибки та покращує BER.

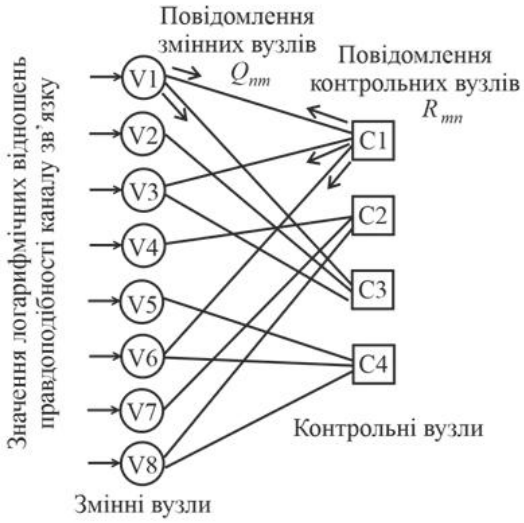
Особливості декодера для стандарту IEEE 802.11. У WLAN стандарту IEEE 802.11n:

- Використовується паралельний або частково паралельний декодер для пришвидшення обробки;
- Число ітерацій зазвичай обмежується для збереження часу затримки;
- Декодер підтримує різні кодові швидкості та довжини блоків, відповідно до матриць H.

Таким чином, декодер LDPC забезпечує високу надійність передачі даних, ефективно виправляючи помилки в каналах з шумом, що робить його ключовим компонентом сучасних бездротових систем.

Для матриці перевірки парності розміром M×N існує M перевірочних вузлів та N вузлів змінних, які ітеративно обмінюються інформацією відповідно до обраного алгоритму декодування LDPC. Елемент «1» у матриці H позначає наявність зв’язку між вузлом змінної та відповідним вузлом перевірки.

Обмін повідомленнями відбувається лише між вузлами, які безпосередньо з’єднані у графі, що відповідає матриці перевірки парності. Процес декодування для прикладу матриці H розміром 4×8 наведено на рисунку 2.2, де показано схему обміну інформацією між вузлами змінних та перевірки.



Змінні вузли отримують м’яку інформацію, тобто ймовірність правильності біта, яка надходить від каналу і наближається до 1 або 0. Ця інформація ітеративно передається між вузлами перевірки та вузлами змінних, щоб задовольнити рівняння перевірки парності, задані матрицею H [1, 2].

Щоб спростити обчислення, операції можна виконувати у логарифмічній області, перетворюючи множення на складання. У цьому випадку декодер працює з коефіцієнтами логарифмічної правдоподібності (LLR), що надходять із каналу [4].

Додатково алгоритм можна спростити до алгоритму декодування з мінімальною сумою, що забезпечує незначне погіршення показника BER, але суттєво знижує обчислювальні витрати.

2.4 Пряме кодування QC-LDPC

Коди QC-LDPC (Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check) є підкласом LDPC-кодів із структурованою матрицею перевірки парності, що складається зі зсунутих одиничних та нульових підматриць. Завдяки такій структурі реалізація кодувальника спрощується і стає більш ефективною в апаратному та програмному забезпеченні.

Пряме кодування QC-LDPC ґрунтується на властивості квазі-циклічної матриці H. Нехай матриця перевірки парності HHH розміром M×NM \times NM×N поділена на блоки підматриць розміром p×pp \times pp×p. Тоді процес кодування полягає у побудові кодового слова c=[u∣p]\mathbf{c} = [\mathbf{u} \,|\, \mathbf{p}]c=[u|p], де:

- u\mathbf{u}u – вектор інформаційних бітів,
- p\mathbf{p}p – вектор перевірочних бітів, обчислений так, щоб задовольняти рівняння перевірки парності H·cT=0H \cdot \mathbf{c}^T = 0H·cT=0.

У QC-LDPC кожна підматриця або є нульовою, або представляє собою зсунутий одиничний блок, що дозволяє реалізувати циклічний зсув бітів замість повного матричного множення. Це значно знижує обчислювальну складність кодувальника.

Для прямого кодування QC-LDPC зазвичай застосовують такі кроки:

1. Розділяють матрицю H на блоки, виділяючи підматриці, що відповідають інформаційним та перевірочним бітам.
2. Обчислюють перевірочні біти через цикл зсувів і сумування по модулю 2, використовуючи властивості квазі-циклічності.
3. Формують кодове слово c\mathbf{c}c, що задовольняє умові H·cT=0H \cdot \mathbf{c}^T = 0H·cT=0.

Такий підхід дозволяє створювати ефективні апаратні та програмні реалізації кодера, що особливо важливо для високошвидкісних бездротових стандартів, таких як IEEE 802.11n/ac/ax.

Універсальний декодер LDPC

Універсальний декодер LDPC призначений для декодування будь-яких LDPC-кодів (структурованих і неструктурованих) без необхідності спеціальної адаптації під конкретну матрицю перевірки парності. Основна мета такого декодера – забезпечити гнучкість та масштабованість, одночасно підтримуючи високу продуктивність декодування.

Основні принципи роботи

1. Представлення матриці перевірки парності. Універсальний декодер використовує стандартне представлення матриці H у вигляді списку зв’язків між змінними вузлами (VN) і перевірочними вузлами (CN). Кожен вузол знає, з якими іншими вузлами він з’єднаний, що дозволяє проводити обмін повідомленнями незалежно від конкретної структури коду.

2. Ітеративне обчислення. Декодування здійснюється ітеративно за алгоритмом belief propagation (BP) або sum-product, де інформація про ймовірності біта (log-likelihood ratio, LLR) передається між CN і VN. Ітераційний процес триває до досягнення задоволення всіх умов перевірки парності або вичерпання максимальної кількості ітерацій.

3. Модульність і масштабованість. Універсальний декодер може працювати з LDPC-кодами різних довжин та кодових швидкостей. Це досягається за рахунок динамічного зчитування структури H і гнучкого виділення ресурсів для вузлів, що робить декодер придатним як для апаратної, так і для програмної реалізації.

Переваги універсального декодера:

- Підтримка будь-яких LDPC-кодів без необхідності перепроектування;
- Зручність інтеграції у різні стандарти зв’язку (IEEE 802.11, DVB-S2, 5G NR);
- Можливість використання різних ітераційних алгоритмів (BP, Min-Sum, Log-MAP) для компромісу між точністю декодування та обчислювальною складністю.

Алгоритм роботи (спрощений):

- Ініціалізація LLR для змінних вузлів на основі прийнятих сигналів;
- Передача повідомлень від VN до CN, обчислення сумарної інформації для кожного CN;
- Передача повідомлень від CN до VN з урахуванням всіх отриманих LLR;
- Перевірка умов перевірки парності для отриманого кодового слова;
- Якщо умови задоволені або досягнуто максимум ітерацій – завершення декодування; інакше – повтор кроків 2–4.

У цьому розділі детально описано реалізацію кодера QC-LDPC та універсального декодера LDPC C99, орієнтованих на сучасні коди LDPC, визначені у стандартах IEEE 802.11-2020 та IEEE 802.16-20.

Для оцінки продуктивності системи були проведені наступні дії:

1. Реалізація кодера та декодера

- Кодер QC-LDPC реалізовано відповідно до специфікацій стандартів IEEE, що дозволяє формувати кодові слова заданої довжини та кодової швидкості.
- Універсальний декодер LDPC C99 застосовує ітераційне декодування з логарифмічною обробкою (LLR) та алгоритм мінімальної суми для оптимізації обчислювальної складності.

2. Оцінка продуктивності помилок

- Проведено симуляції BER та PER для різних кодових швидкостей та довжин блоків.
- Результати порівняно з реалізацією із закритим початковим кодом MATLAB R2021b Communications Toolbox, що показало близькі значення продуктивності помилок при меншій обчислювальній складності.

3. Аналіз пропускної спроможності

- Оцінено ефективну пропускну здатність системи для різних конфігурацій LDPC-кодів.
- Проведено порівняння на різних апаратних платформах (Intel та AMD), що дозволило оцінити вплив архітектури процесора на швидкість кодування та декодування.

4. Висновки

- Реалізовані QC-LDPC та універсальний декодер LDPC демонструють високу надійність передачі даних та добру пропускну здатність у сучасних бездротових мережах.
- Порівняння з MATLAB Toolbox підтвердило ефективність запропонованих алгоритмів на практичних платформах, що дозволяє застосовувати їх у реальних системах Wi-Fi та LTE/5G.

3 ДЕКОДЕР QC-LDPC З МАЛОЮ ЗАТРИМКОЮ

3.1 Квазіциклічні коди LDPC

Коди QC-LDPC (квазіциклічні коди з перевіркою парності низької щільності) набули широкого поширення завдяки своїм відмінним характеристикам виправлення помилок. Вони застосовуються у багатьох сучасних системах бездротового зв’язку, зокрема:

- Wi-Fi (стандарти IEEE 802.11n/ac/ax);
- Wi-Max (IEEE 802.16e);
- 5G NR (3GPP TS 38);
- DVB-S2.

Для квазіциклічних кодів QC-LDPC переважно використовуються два типи декодерів, які реалізують ітераційне обмінювання повідомленнями між вузлами матриці перевірки парності. Стандартний підхід до декодування складається з двох етапів та відомий як:

- Граф лавинного розсилання (Flooding Schedule, FS);
- Алгоритм суми добутків (Sum-Product Algorithm, SPA).

Обидва методи дозволяють ефективно виконувати ітеративне декодування, забезпечуючи високу точність виправлення помилок у переданих даних.

На першому етапі декодера QC-LDPC всі повідомлення від вузлів змінних (Variable Nodes, VN) передаються до вузлів перевірки (Check Nodes, CN) та оновлюються. На другому етапі відбувається обчислення значень самих вузлів перевірки (CN), які використовуються для наступної ітерації декодування.

Метод ітераційного обміну повідомленнями між вузлами вперше представив Роберт Галлагер у 1962 році, а в середині 1990-х років Девід Маккей відновив його для сучасних кодувальних систем LDPC.

У багаторівневому розкладі (Layered Schedule, LS) матриця перевірки парності розглядається як послідовність горизонтальних або вертикальних шарів.

Це дозволяє обчислювати вузли поступово по шарах, що скорочує час конвергенції декодера порівняно зі стандартним графом лавинного розсилання (Flooding Schedule, FS).

Цей багаторівневий принцип (Layered Schedule, LS) дозволяє позбутися стандартного графа лавинного розсилання (Flooding Schedule, FS) та підвищити швидкість збіжності декодера за рахунок негайного обміну інформацією між шарами матриці перевірки парності. Дослідження показують, що коефіцієнт прискорення збіжності у високому відношенні сигнал/шум (SNR) становить приблизно два [9].

Це особливо вигідно для стандартів, де швидкість передачі декодованого каналу є низькою (наприклад, 4 мкс або менше для IEEE 802.11ax), оскільки багаторівневе декодування значно скорочує час обробки та покращує продуктивність системи.

Горизонтально-рівневі декодери (Layered Decoders, LD) стали основною архітектурою для LDPC-кодів завдяки ефективнішому використанню пам’яті та зменшеній кількості тактових циклів на ітерацію [10],[11]. Однак конвеєрна обробка в LD передбачає послідовну передачу повідомлень між суміжними рівнями, оскільки обробка кожного наступного рівня потребує отримання оновленої інформації від попереднього. Це особливо критично при високому ступені паралелізму, коли ресурси процесора активно задіяні.

В результаті така залежність призводить до затримок обробки, виникнення циклів очікування та зниження загальної пропускної спроможності декодера [3].
Ступінь паралельності декодерів QC-LDPC можна класифікувати на послідовний, частково паралельний та повністю паралельний. У послідовному режимі і вузли змінних (VN), і вузли перевірки (CN) обробляються по одному, тобто ступінь паралельності дорівнює одиниці. Для повністю паралельних VN цей показник дорівнює довжині коду, а для CN – довжині бітів парності. Оскільки послідовні декодери мають низьку пропускну здатність, сучасні дослідження зосереджені на використанні часткового та повного паралелізму.

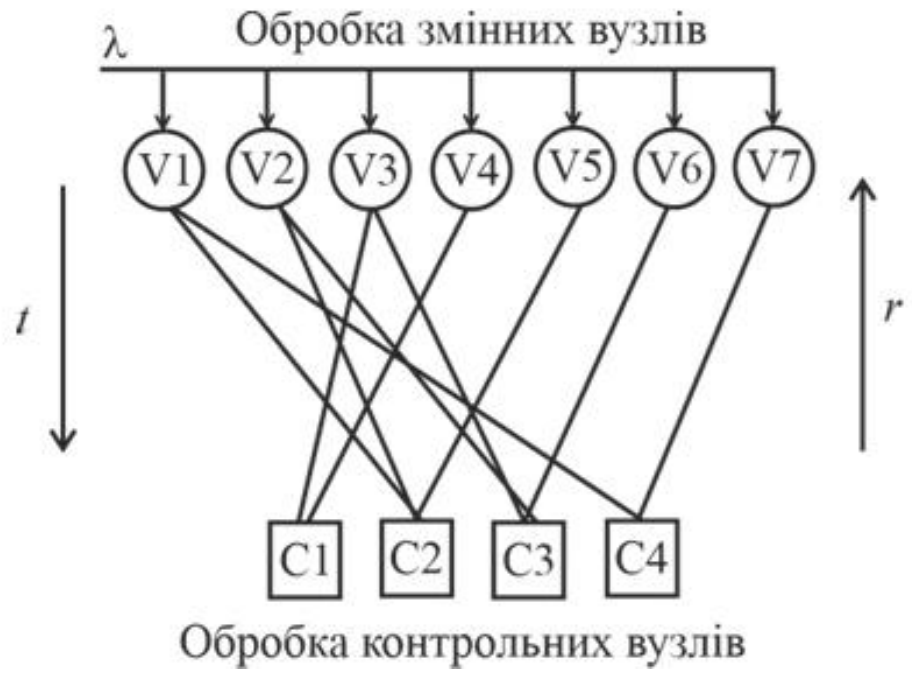
Часткова паралельність передбачає блокову серіалізацію, коли ступінь паралельності VN і CN відповідає величині коефіцієнта підйому ZZZ. При паралелізмі рядків вузли змінних (VN) мають ступінь паралельності, що дорівнює довжині коду, тоді як вузли повністю паралельному режимі VN обробляються з паралельністю, що дорівнює перевірки (CN) – розміру ZZZ. У довжині коду, а CN – з паралельністю, яка дорівнює довжині бітів парності.

Оскільки повністю паралельна архітектура (FPA) не сумісна з багаторівневим розподілом (LS), її зазвичай поєднують із схемою лавинного розсилання (FS) для виконання ітерації за один такт.

У той же час, рядно-паралельна архітектура (RPA) та блочно-послідовна архітектура (BSA) працюють із LS, при цьому RPA зазнає більшої залежності від попередніх даних. У багатьох дослідженнях для рядно-паралельної архітектури (RPA) застосовують поперемінне багатокадрове декодування разом із технологією міжрівневого злиття, щоб зменшити проблему залежності даних. Проте використання багатокадрового чергування збільшує потребу в ресурсах пам’яті.

Технологія міжрівневого злиття допомагає скоротити глибину конвеєрів при низькій швидкості кодування, але вона не є оптимальною для стандартів WLAN. У протоколах, що використовують коди QC-LDPC, вага перших кількох стовпців відповідає кількості шарів.

Висока складність апаратної реалізації та надмірне навантаження на маршрутизацію у FPA та RPA потребують значної площі кристала [8]. BSA дозволяє автономно переставляти рядки та стовпці матриць перевірки парності (PCM), що допомагає зменшити або усунути період затримки [1]. Петрович пропонує комбіноване використання LS та FS у випадках критичних сценаріїв, хоча це уповільнює швидкість збіжності [2].



Граф Танера для LDPC-коду

Граф Танера (Tanner graph) є графічним представленням кодів LDPC, який показує зв’язки між змінними вузлами (VN) і контрольними вузлами (CN). У цьому графі:

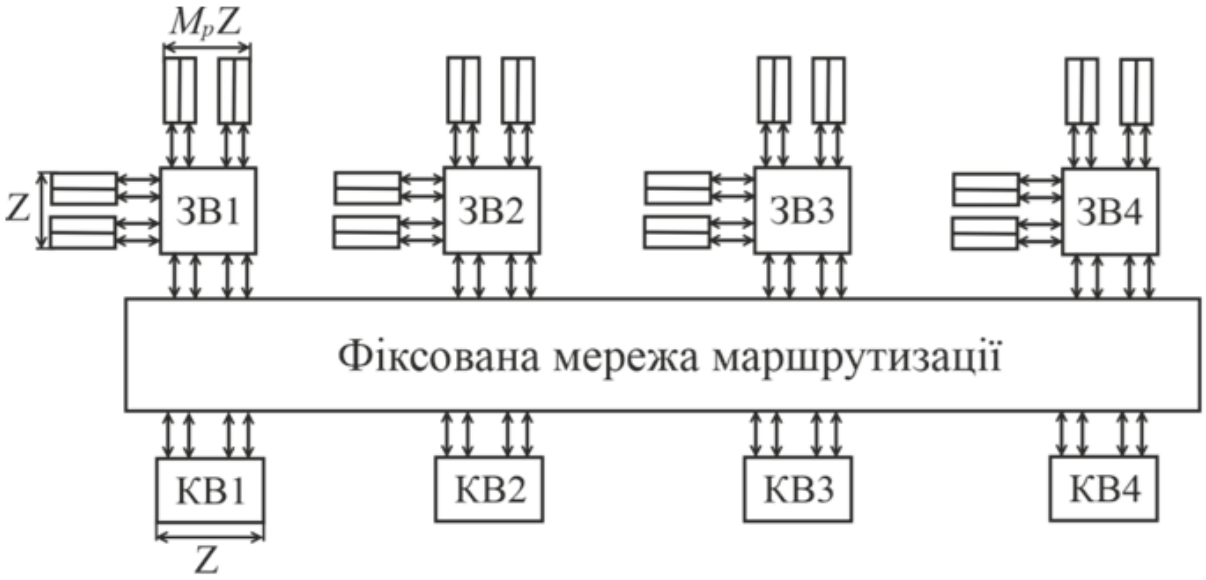
- Змінні вузли (VN) відповідають бітам кодового слова;
- Контрольні вузли (CN) представляють рівняння перевірки парності;
- Ребра між VN і CN відображають, які біти входять до конкретного контрольного рівняння.

Обмін повідомленнями між VN і CN у Tanner graph відбувається ітеративно під час декодування LDPC. Граф дозволяє наочно відстежувати зв’язки та залежності, що важливо для реалізації ефективних декодерів, включно з алгоритмами sum-product і мінімальної суми.

Tanner graph також використовується для аналізу циклів у коді, які можуть впливати на швидкість збіжності декодера та кінцеву пропускну здатність системи.

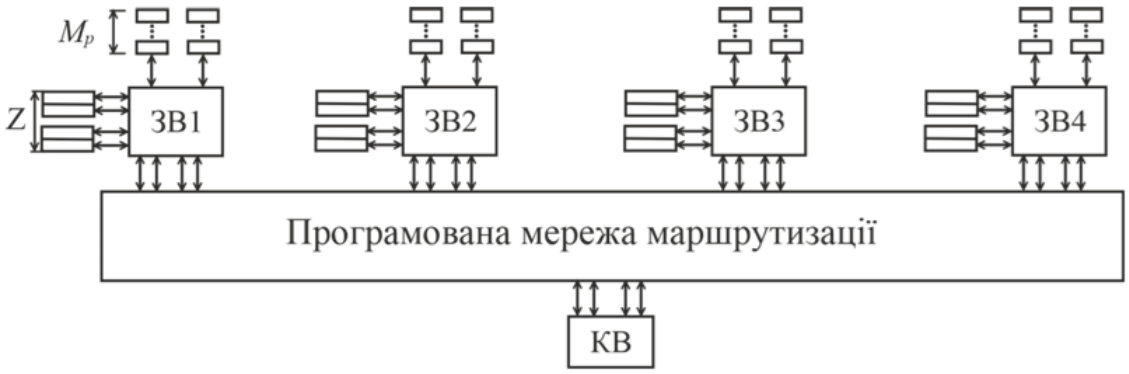
3.2 Архітектура декодера квазіциклічних кодів

Розглянемо повністю паралельну архітектуру (FPA). Як показано на рис. 3.2, у цій архітектурі паралелізм процесора змінних вузлів (VNP) дорівнює довжині кодового слова, а паралелізм процесора контрольних вузлів (CNP) відповідає кількості вузлів перевірки (CN). Відповідно, загальна кількість обчислювальних елементів (PE) пропорційна довжині коду і обернено пропорційна швидкості коду.



Для серії протоколів IEEE 802.11n/ac/ax, коли довжина кодового слова становить 1944, а швидкість коду дорівнює 1/2, кількість обчислювальних блоків для змінних вузлів (VNPU) дорівнює 1944, тоді як для контрольних вузлів (CNPU) – 972. Через велику кількість міжз’єднувальних проводів повністю паралельна архітектура (FPA) не підходить для гнучкої роботи з різними довжинами кодів або швидкостями коду, оскільки це створює значне навантаження на маршрутизацію. FPA застосовує максимальний рівень паралелізму, виконує одну ітерацію за такт і зазвичай забезпечує найвищу пропускну спроможність.

Розглянемо рядково-паралельну архітектуру декодера QC-кодів. Як показано на рис. 3.3, матриця перевірки парності (PCM) розбивається на кілька горизонтальних шарів відповідно до розміру LF, а рядково-паралельна архітектура дозволяє обробляти кожен горизонтальний шар паралельно за один такт.



У рядково-паралельній архітектурі паралелізм процесора змінних вузлів (VNP) дорівнює довжині кодового слова, тоді як паралелізм процесора контрольних вузлів (CNP) визначається розміром LF. Кожен CNPU з'єднує 24 віртуальні мережі через настроювану мережу маршрутизації.

У випадку блочно-послідовної архітектури (BSA), як показано на рис. 3.4, паралелізм VNP і CNP також відповідає розміру LF. VNP та CNP обходять лише активні елементи матриці перевірки парності (PCM) або ненульові підматриці прототипу.



При обробці одного блоку кожен процесор контрольного вузла (CNPU) підключається лише до одного змінного вузла через мережу маршрутизації. Блочно-послідовна архітектура (BSA) зазвичай дозволяє мінімізувати апаратні ресурси, необхідні для реалізації коду QC-LDPC.

3.3 Залежність даних багаторівневого декодера

У багаторівневих (LS) декодерах оновлення повідомлень між сусідніми рівнями матриці перевірки парності відбувається послідовно, що створює залежність даних між рівнями. Іншими словами, початок обробки наступного шару неможливий до отримання оновлених повідомлень із попереднього шару. Така послідовність обробки особливо критична при високому ступені паралелізму, оскільки створює цикли очікування та обмежує швидкість збіжності алгоритму декодування.

Ця залежність може спричиняти затримки та зниження пропускної здатності, особливо в системах з високим навантаженням і швидкістю передачі

даних. Тому при проєктуванні багаторівневих декодерів важливо враховувати компроміс між швидкістю збіжності та апаратною складністю для забезпечення оптимальної роботи QC-LDPC декодерів.

Алгоритми низької затримки для QC-LDPC призначені для прискорення збіжності декодування без збільшення апаратної складності. Основна ідея полягає в миттєвому обміні повідомленнями між рівнями матриці перевірки парності після обробки кожного шару. Це дозволяє наступним рівням починати обчислення не чекаючи завершення всіх обчислень попереднього шару, на відміну від класичного багаторівневого (LS) підходу.

Такі алгоритми значно зменшують затримку обробки одного кадру і підвищують пропускну здатність при високих швидкостях передачі. Крім того, використання LLD сприяє ефективнішому паралелізму: повідомлення змінних вузлів (VN) швидко передаються вузлам перевірки (CN), що забезпечує швидше задоволення умов парності і скорочення кількості ітерацій для досягнення стабільного декодування.

LLD особливо ефективний у стандартних реалізаціях Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), де швидкість передачі та обмеження часу циклу декодування є критичними параметрами. Алгоритм може працювати як у поєднанні з горизонтально-рівневими (LD), так і з повністю або частково паралельними архітектурами декодера, адаптуючись до різних вимог до пропускної здатності та апаратної складності.

Архітектура декодера з мінімальною затримкою створена для прискорення процесу декодування QC-LDPC-кодів при високій пропускній здатності без значного збільшення апаратної складності. Основний принцип полягає у миттєвому обміні інформацією між рівнями матриці перевірки парності (PCM), що дозволяє починати обчислення на наступному рівні відразу після отримання оновлених повідомлень від попереднього.

У такій архітектурі:

1. Вузли змінних (VN) **та** вузли перевірки (CN) організовані для ітеративного обміну повідомленнями, причому кожне повідомлення передається без затримки очікування завершення всіх обчислень на поточному рівні.

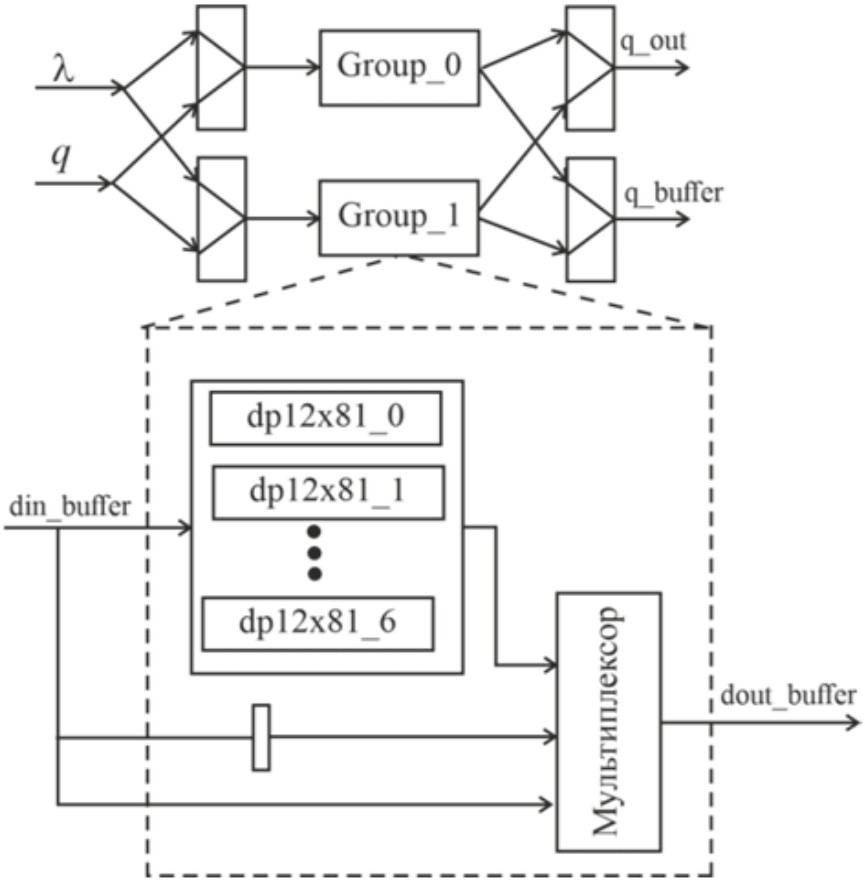
2. Горизонтально-рівневий підхід дозволяє одночасно обробляти кілька рядків матриці PCM, скорочуючи час ітерацій декодування.

3. Архітектура підтримує частковий та повний паралелізм, завдяки чому можна оптимально налаштувати баланс між пропускною здатністю та апаратними ресурсами.

4. Застосування технологій, таких як багатокадрове чергування та міжрівневе злиття, дозволяє зменшити затримку та покращити збіжність алгоритму, хоча ці методи можуть вимагати додаткових ресурсів пам’яті.

Впровадження архітектури з мінімальною затримкою особливо важливе для сучасних стандартів Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), де короткі часові слоти та висока щільність мережі створюють жорсткі обмеження на час обробки даних. Така архітектура забезпечує оптимальну швидкість декодування, зменшує затримки при передачі пакетів та підтримує ефективну роботу декодера у середовищах з високим навантаженням.

Апаратна архітектура декодера QC-LDPC з мінімальною затримкою та подвійним потоком побудована на основі алгоритму 2. Декодер включає такі функціональні блоки: обчислювач параметрів, препроцесор, ядро декодування та постпроцесор, рис. 3.5. Кожен блок виконує специфічні операції для забезпечення швидкої та ефективної обробки повідомлень між вузлами змінних і вузлами перевірки, що дозволяє досягати високої пропускної здатності при низьких затримках.



Препроцесор виконує перетворення отриманих повідомлень LLR у фактичні кодові слова. У кожному циклі обробляється 112 бітів, що відповідають вхідній інформації, з квантуванням на рівні 7. Базовий модуль перетворює повні кодові слова на інформаційні біти, придатні для подальшої обробки. Постпроцесор відповідає за видалення надлишкових бітів і забезпечує відповідність ширини даних вимогам системи зв’язку.

Основний модуль складається з таких компонентів: буферів, циклічних зсувів (CS), H-LUT (таблиці пошуку Hp1 та Hp2), T-калькулятора (TC), процесора (PU), блоку жорсткого рішення (HD) та глобального контролера (GC). Вхідні дані LLR спочатку зберігаються у буфері Q, який одночасно використовується як пам’ять для оновлення повідомлень LLR. На першій ітерації вихідний сигнал буфера R встановлюється у нуль. Для забезпечення конвеєрної обробки безперервних кодових слів буфер Q організований у дві групи однакового

розміру. Глибина буфера Q становить 12, а його ширина дорівнює 567 (з2 — квантування).

Декодер LDPC низької складності розроблений для ефективного відновлення кодових слів при мінімальних апаратних витратах. Основні функціональні блоки включають препроцесор, ядро обчислень, постпроцесор та допоміжні модулі, такі як буфери, таблиці пошуку (H-LUT) та контролери. Препроцесор перетворює вхідні значення логарифмічного відношення ймовірності (LLR) у формат, придатний для подальшої обробки. Ядро здійснює ітеративне оновлення повідомлень між вузлами змінних та вузлами перевірки, забезпечуючи збіжність алгоритму при низькій складності обчислень. Постпроцесор формує остаточне рішення, видаляючи додаткові або допоміжні біти та підлаштовуючи вихідні дані під вимоги системи. Для підтримки конвеєрної обробки буфери організовані у групи та мають розмір, що дозволяє обробляти декілька кодових слів одночасно без втрати точності. Така архітектура дозволяє досягти збалансованого поєднання низької апаратної складності та прийнятної пропускної здатності.

У третьому розділі описується конструкція QC-LDPC декодера з мінімальною затримкою та подвійним шляхом обробки, що поєднує низьку апаратну складність, високу пропускну здатність та безперервну роботу. Використання запропонованого алгоритму дозволяє одночасно обробляти два блоки даних і ефективно долати залежності, властиві багаторівневому декодуванню. Стратегія подвійного шляху сприяє зменшенню часу затримки та збільшенню пропускної здатності декодера при збереженні практично тієї ж якості відновлення бітів (BER). Крім того, для цієї схеми була розроблена та реалізована відповідна апаратна архітектура.

4 НАДІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ З НИЗЬКОЮ ЗАТРИМКОЮ ЧЕРЕЗ БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ

Зростаюча складність сучасних промислових і виробничих систем, що містять численні датчики та мобільні компоненти, вимагає надійного зв'язку з низькою затримкою через бездротові мережі. WiFi 7 задовольняє ці вимоги завдяки вдосконаленням, таким як Multi-Link Operation (MLO), що дозволяє одночасно використовувати кілька частотних діапазонів і забезпечує внутрішню різноманітність каналів. Це ставить питання, чи можна ефективно використовувати MLO для надійності критичних систем. У цій статті ми досліджуємо інтеграцію IEEE 802.1CB Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER), основного стандарту Time-Sensitive Networking (TSN), у MLO, щоб розв'язати це питання. Ми представляємо відкриту реалізацію FRER over MLO у симуляторі OMNeT++, висвітлюємо ключові виклики в поєднанні цих технологій і оцінюємо її ефективність у підвищенні надійності в умовах, специфічних для бездротового зв'язку, таких як мобільність і перевантаження. Наші результати демонструють, що FRER може покращити коефіцієнт доставки пакетів і забезпечити обмежену затримку, хоча й за рахунок зниження ефективності каналу через резервування.

Сучасні критичні системи, такі як розумні промислові та виробничі об'єкти, складаються з численних взаємопов'язаних компонентів, які потребують низької затримки та високої надійності зв'язку. Хоча традиційні мережі на базі fieldbus та Ethernet успішно відповідали цим вимогам, зростаюче впровадження сенсорів і мобільних компонентів, таких як автономні роботи, вимагає використання бездротових технологій. Відповідно, забезпечення надійного та майже детермінованого зв'язку через бездротове середовище стало життєво необхідним.
Однією з найновіших бездротових технологій, що задовольняють ці змінні потреби, є IEEE 802.11be Extremely High Throughput (EHT), також відомий як WiFi 7. Окрім різних покращень, таких як покращена спектральна ефективність і вища модуляція та кодування [1], WiFi 7 вводить ключову функцію: багатоканалову роботу (MLO). Ця функція дозволяє WiFi-станціям (STA) та

точкам доступу (AP) (так званим multi-link devices (MLD)) одночасно використовувати кілька частотних діапазонів на 2,4, 5 та 6 GHz. MLO забезпечує як частотне, так і просторове різноманіття між різними радіоінтерфейсами, допомагаючи зменшити збої каналу, погіршення стану каналу та перевантаження в окремих частотних діапазонах. Ці переваги можна використати шляхом динамічного перемикання між лінками або їх одночасного використання для досягнення резервності. Однак це вимагає розробки інтелектуальних стратегій комутації каналів у реальному часі та ефективних протоколів резервування, адаптованих до характеристик бездротового зв'язку.

Для розробки таких механізмів надійності ми можемо спочатку розглянути стандартизовані підходи для оцінки їхньої адаптивності. Наприклад, IEEE 802.1 Time-sensitive Networking (TSN) визначає набір протоколів для мереж на основі Ethernet для забезпечення детермінованого наскрізного зв'язку. Один із його основних стандартів, IEEE 802.1CB Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER), вводить механізми для досягнення резервування без накладання специфічних топологічних обмежень, а його ефективність проти відмов вузлів і каналів була продемонстрована в різних дослідженнях [2]. Хоча спочатку вона була розроблена для багатошляхового зв'язку в Ethernet-мережах, реалізація функцій FRER є гнучкою для адаптації до різних мережевих архітектур і вимог [3]. Відповідно, поєднання FRER з MLO пропонує перспективний механізм відмовостійкості, який поєднує (i) чітко визначений, налаштовуваний протокол із (ii) багатозв'язністю та різноманітністю каналів. Це може запобігти втратам пакетів, зменшити повторні передачі та покращити якість обслуговування (QoS), особливо з точки зору наскрізної затримки.

Співіснування TSN і WiFi привернуло значну увагу останніми роками [4], [5]. Ця інтеграція є логічною та необхідною, оскільки обидві технології стандартизовані IEEE і часто впроваджуються разом у гібридних дротових бездротових мережах. Однак слід враховувати наслідки використання протоколу Ethernet для бездротового зв'язку для цієї інтеграції. Хоча деякі попередні дослідження вивчали використання FRER замість MLO [6], вплив мобільності,

заторів на конкретні лінії та виклики розгортання FRER у бездротовому середовищі залишаються недостатньо дослідженими. Крім того, проблеми з реалізацією розширення WiFi-мережевого стеку для підтримки функцій FRER ще не повністю зрозумілі.

Досліджуємо принципи інтеграції FRER порівняно з MLO та оцінюємо його надійність і продуктивність. Наші основні внески можна підсумувати так:
Ми представляємо реалізацію з відкритим кодом[1] FRER над MLO за допомогою інструментарію для моделювання OMNeT++. Вона базується на нашій попередній реалізації MLO, представленій у [7].

Ми детально описуємо виклики реалізації та конфігурації, а також необхідні модифікації для сумісності цих двох технологій.

Ми оцінюємо ефективність FRER у вирішенні збоїв і проблем, таких як мобільність і перевантаження у бездротових мережах.

Решта цієї статті організована так: Розділ 2 знайомить з основами FRER та MLO. Розділ 3 розглядає пов'язані роботи. Розділ 4 дає архітектурний огляд об'єднаного стеку FRER і WiFi, а розділ 5 детально описує нашу реалізацію. Розділ 6 містить наш аналіз і оцінку ефективності. Розділ 7 висвітлює відкриті питання, а розділ 8 завершує статтю.
У цьому розділі ми представляємо основи FRER і MLO як основні функції для реалізації резервування через WiFi.

4.1. Реплікація кадрів і усунення для надійності

IEEE 802.1CB Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER) пропонує механізм статичної надлишковості шляхом реплікації Ethernet-кадрів через кілька, бажано неперетинні вузлові резервні шляхи. Він також включає механізм усунення, що працює на мостах TSN, тобто на Ethernet-комутаторах у термінології TSN, та кінцевих хостах для відкидання дублікатів пакетів. Цей механізм запобігає надлишковим передачам по одному каналу та захищає мережу від циклів і застряг відправників [8].

Рис. 1 показує використання FRER у мережі, де три неперетинні шляхи призначаються потоку розмовника, наприклад, два з них для резервування. На

рисунку як слухач, так і міст, що пересилає два потоки учасників, можуть відкидати резервні пакети. Зверніть увагу, що talker — це Ethernet-хост, який надсилає трафік даних, а слухач — це призначений отримувач цього трафіку. Зазвичай розмовник виконує:

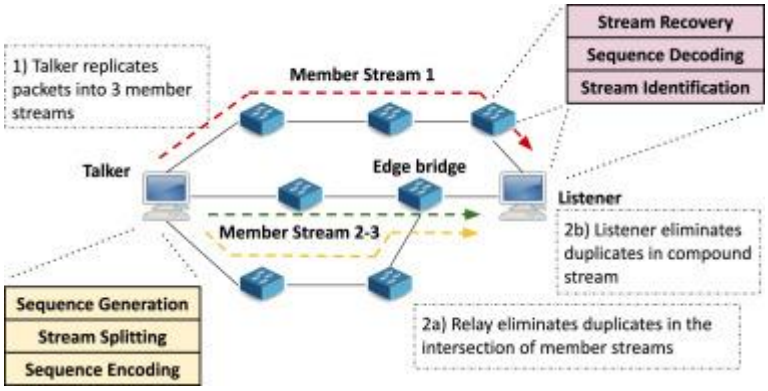


Рис. 4.1. Приклад розгортання FRER із резервними шляхами.

Генерація послідовності шляхом генерації унікального ідентифікатора на кожен пакет потоку, який потрібно збільшувати для інших пакетів послідовності.
Розділення потоків шляхом копіювання пакетів і створення членських потоків для передачі Чіткі шляхи. У цьому контексті потік учасників означає дубльований потік даних, що походить із основного потоку. Вони можуть існувати в будь-якій кількості залежно від ступеня надлишковості, тобто кількості надлишкових шляхів.
Кодування послідовності шляхом присвоєння номера послідовності скопіюваним пакетам через так званий тег надлишковості (R-TAG).

Зверніть увагу, що кілька мостів TSN можуть існувати вздовж кінцевого шляху. Вони можуть дублювати або виключати кадри на льоту відповідно до заданої конфігурації. З одного боку, додаткове дублювання на проміжних мостах може захистити окремі сегменти мережі за потреби. З іншого боку, раннє усунення перед передачею слухачу покращує використання посилань, уникаючи зайвих дублікатів. Наприклад, на рис. 1 потоки учасників 2 і 3 можна об'єднати на крайньому мосту (тобто на мосту, безпосередньо підключеному до кінцевого хоста), якщо канал доступу, підключений до слухача, є надійним.

Потім слухач або проміжний міст на кінцевому шляху виконує:

Ідентифікація потоку шляхом застосування функції ідентифікації потоку для розрізнення потоку. Обов'язковий *метод ідентифікації нульового потоку* використовує MAC-адреси джерела або призначення та ідентифікатор віртуальної локальної мережі (VLAN) пакета як вхід. Опціонально ця функція може використовувати порти джерела та призначення, IP-адреси та кодову точку диференційованих сервісів (DSCP) як параметри.

Декодування послідовностей шляхом вилучення ідентифікатора послідовності пакета для порівняння з інформацією послідовності ідентифікованого потоку.

Відновлення потоку, вирішивши, чи є пакет дублюванням і чи слід скинути або переслати. Це зрештою об'єднує учасники потоків з оригінальним.

Виявлення прихованих помилок шляхом підрахунку, чи отримав він очікувану кількість дублікатів пакетів для виявлення збою вузла або каналу на шляху потоку-учасника.

На стороні приймача етап відновлення потоку складається з двох функцій. Функція відновлення послідовності (SRF) обробляє всі пакети, отримані з різних портів комутатора, і тому може виявляти дублікати пакети потоку, що надходять з різних шляхів. На відміну від цього, індивідуальна функція відновлення (IRF) обробляє потік, що надходить з одного шляху (або порту), і ефективна, наприклад, проти дублювання пакетів через застряг відправника. Будь-яка функція відновлення використовує алгоритм для вибору переадресації або скидання пакетів. Першим варіантом є алгоритм відновлення збігу (MRA), який відстежує останній отриманий номер послідовності та усуває будь-які наступні пакети з меншою або рівною кількістю. Другий — це векторний алгоритм відновлення (VRA), який усуває пакети з конкретного вікна номерів послідовності в межах діапазону. Для цих функцій встановлюється тривалість тайм-ауту, щоб скинути очікуваний номер послідовності (та інтервал), щоб оновити функцію відновлення у разі не пересилання пакета протягом зазначеного часу через випадкові збої.

4.2. Багатоз'єднана робота WiFi 7

У WiFi 7 MLO усуває суворе розділення між кількома бездротовими інтерфейсами, розгорнутими на STA та AP. Хоча пристрої WiFi 6 також можуть вибірково використовувати канали 2,4 ГГц або 5 ГГц по одному, MLO-сумісні MLD у термінології WiFi одночасно використовують кілька бездротових каналів у координації. Це вимагає певних архітектурних покращень у стеку протоколів WiFi. Тут ми коротко описуємо відповідні зміни у нашій реалізації.

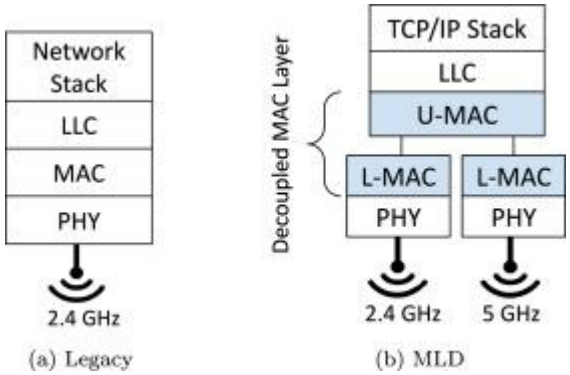
Стек протоколів на застарілих WiFi-пристроях складається з трьох рівнів: логічного керування каналом (LLC), керування доступом до середовища (MAC) та фізичний рівень (PHY) [9], як показано на рис. 2а. Їхні функції такі:

Рівень LLC є інтерфейсом до вищих рівнів, наприклад, протоколів мережевого рівня, і може за бажанням реалізувати додаткові функції контролю потоків і помилок. Він здійснює мультиплексування та демультиплексування кількох протоколів верхнього рівня на одному MAC-рівні.

Рівень MAC відповідає за доступ до каналів для передачі пакетів, уникаючи перешкод при поточних передачах у спільному бездротовому носії. У останньому стандарті WiFi цей рівень зазвичай використовує гібридні координаційні функції (HCF) як механізм доступу до каналу. Як частина HCF, основною функцією доступу до середовища на основі конфліктів є Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) [10]. Він виконує множинний доступ із фіксацією оператора з уникненням колізій (CSMA/CA), коли пристрої слухають канал і передають, коли він залишається вільним на рандомізований період відключення. EDCA також адаптує цей період для різних класів трафіку (або категорій доступу), щоб пріоритезувати різні потоки трафіку відповідно до вимог QoS. WiFi MAC також може використовувати інші методи доступу до каналу, такі як ортогональний частотний множинний доступ (OFDMA) та RTS/CTS на основі рукостискання. Ці методи виходять за межі цього дослідження, але зацікавлені читачі можуть знайти більше інформації у [11]

Рівень PHY здійснює радіопередачу на певній несучій частоті.

Окрім цієї архітектури, MLO вимагає диференціації різних аспектів кількох інтерфейсів, таких як розподіл трафіку, параметризація QoS та механізми конкуренції. Тому MLD мають роз'єднані верхні та нижні MAC-шари (U-MAC і L-MAC, див. рис. 2b) для організації своїх пов'язаних зв'язків:

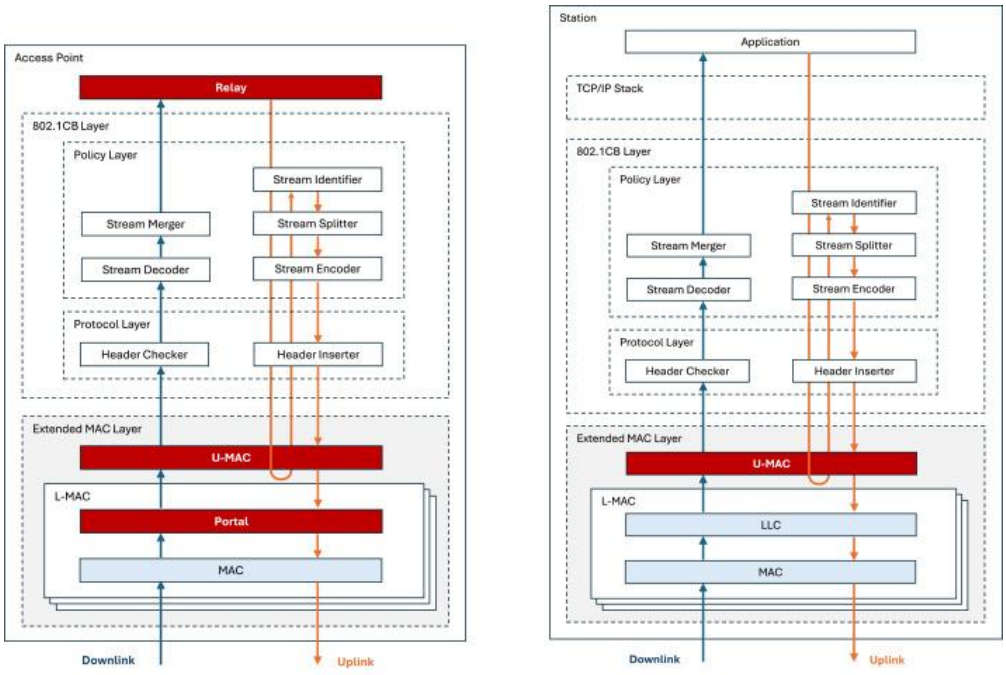


U-MAC є абстракцією для всіх інтерфейсів і виконує функції, незалежні від зв'язку, такі як агрегація кадрів і кодування послідовних номерів. Вихідні кадри чекають у U-MAC, доки не будуть призначені одному або кільком інтерфейсам для передачі. Це забезпечує гнучку координацію каналів (наприклад, для балансування навантаження та виконання політики QoS) та управління (наприклад, налаштування, асоціація та автентифікація) для кращої масштабованості та наскрізного QoS. Абстракція U-MAC також робить MLO прозорим для верхніх шарів над MAC.

L-MAC обробляє операції на рівні каналу, такі як доступ до каналу, що відповідає конкретним потребам QoS та рівням конкуренції на кожному зв'язку. Він виконує функції, пов'язані з кадрами, такі як створення та перевірка MAC-заголовків, подібно до уніфікованого MAC. Коли STA виконують конкуренційний доступ до каналу, наприклад EDCA, L-MAC відповідає за визначення каналів і передачу відповідно до конфігурації QoS. На відміну від нього, для методів доступу до каналу з підтримкою AP (наприклад, планування OFDMA та RTS/CTS рукостискання), кілька L-MAC у межах однієї станції можуть потребувати додаткової координації з U-MAC для оптимального розподілу та планування трафіку між лінками.

У стандарті WiFi 7 MLO працює переважно у двох режимах: одночасна передача і прийом (STR) та неодночасна передача і прийом (NSTR) [1]. У STR

MLD може незалежно передавати та приймати через кілька каналів, кожне з яких здійснює окремий доступ до каналу. Потоки даних призначаються лінкам у U-MAC через процедуру, що називається TID-to-link mapping, яка асоціює кожен потік із конкретним каналом на основі його класу трафіку, позначеного ідентифікатором трафіку (TID). Продуктивність кожного каналу залежить від його індивідуальних умов, таких як шум, перешкоди та перевантаження. Натомість NSTR вимагає синхронізації передавальних каналів MLD, щоб запобігти перешкодам при співіснуванні в пристрої (IDC) [12]. Цей тип перешкод виникає, коли одночасна передача та прийом через кілька каналів спричиняє перешкоди передавальних радіостанцій приймачам у межах одного пристрою. Проблема виникає через те, що переданий сигнал значно сильніший за слабкий зовнішній сигнал, який приймач намагається виявити. Тому доступ до каналів потенційно заважаючих інтерфейсів має координуватися U-MAC відповідного MLD. Зверніть увагу, що наша реалізація враховує лише режим STR, у якому кожен L-MAC MLD здійснює власний доступ до каналу для потоків даних, призначених U-MAC.



(a) AP MLD (b) STA MLD

Рис. 4.3. Розширено стек протоколів 802.11 для підтримки IEEE 802.1CB поверх MLO.

У цьому розділі ми представляємо пов'язані дослідження щодо інтеграції FRER у бездротові мережі загалом та підходів до резервування у WiFi.

FRER у бездротових мережах

Використання протоколів TSN, включно з FRER, над бездротовими технологіями нещодавно було досліджено в літературі. У [5] коротко розглядаються потенційні стратегії застосування FRER замість MLO. Автори пропонують механізм вищого рівня 802.1CB для керування надлишковими тегами та конфігураціями потоків, що допомагає U-MAC. [13] підкреслює стандарт IEEE 802.11ak, який дозволяє інтегрувати FRER на архітектурному та протокольному рівні з MLO [14]. Стандарт розглядає точки доступу 802.11 подібно до мостів 802.1 TSN і підтримує вибір шляхів між вузлами та зв'язками. У WiFi це означає різноманіття з'єднання, яке дозволяє MLO. Ці роботи не містять жодної конкретної реалізації чи оцінки, а розглядають інтеграцію FRER–MLO лише на концептуальному рівні. Проєкт пропозиції у [15] базується на останній ідеї, пропонуючи конструкцію, при якій STA та точки доступу можуть підключатися до кількох партнерів, забезпечуючи багатошляхову підключеність, подібну до FRER. Автори безпосередньо не пропонують розгортання FER, а обговорюють переваги резервування над кількома точками доступу, що нагадує функцію координації мульти-точка доступу майбутнього Wi-Fi 8 [16].

[17] поєднуйте FRER з IEC 62439 High-availability Seamless Redundancy (HSR) для забезпечення резервування у бездротових локальних мережах. Хоча вони безпосередньо не використовують MLO, їхня пропозиція передбачає WiFi-компоненти з кількома інтерфейсами. Вони також демонструють переваги затримки безшовного резервування на основі FRER у своєму індивідуальному прототипі. В іншому дослідженні [18] досліджують FRER у автомобільних мережах, зосереджуючись на взводному складі для міжтранспортної комунікації. FRER також вивчався в гібридних мережах 5G-TSN, які поєднують механізми резервування з розширеннями 5G. Роботи, такі як [19], [20], [21], досліджують різні сценарії розгортання та інтеграції для підвищення наскрізної надійності між

дротовими та бездротовими каналами. Ці теми виходять за межі нашого дослідження, яке зосереджене саме на FRER у WiFi 7.

Резервування через WiFi

До впровадження MLO кілька досліджень [25], [26], [27] показали, що резервність у WiFi покращує затримку та надійність. У [22] автори пропонують метод умовної надлишковості, де дублювання по кількох каналах запускається лише тоді, коли зв'язки не корелюють за середньою затримкою та втратою пакетів. Вони також зазначають, що цей підхід найбільш ефективний при низькому навантаженні мережі та при мінімальній кореляції зв'язків. Подібна стратегія представлена у [23], де умовне дублювання застосовується до трафіку в реальному часі за допомогою MLO. Дублювання активується, коли затримка черги на пакет перевищує заздалегідь визначений поріг. Наприклад, при порозі 40% і бюджеті затримки 10 мс, MLD дублює пакети після затримки в черзі в 4 мс. Нижчі пороги підвищують частоту дублювання, підвищуючи надійність за рахунок спектральної та енергоефективності. Жодне з цих досліджень явно не використовує FRER або не досліджує його застосування у більш загальному терміново-чутливому WiFi-середовища.

У [24] автори пропонують концептуальний дизайн інтеграції FRER через WiFi як у одно- та багато-точкових конфігураціях. Вони обговорюють кілька викликів у досягненні безшовної резервування у WiFi. Хоча і MLO, і FRER є частиною їхньої пропозиції, автори не проводять жодних експериментів для оцінки продуктивності інтегрованої фреймворку MLO–FER. [6] представляємо прототипну реалізацію FRER із використанням власних WiFi-інтерфейсів. Замість MLO вони використовують два окремі пристрої відправника та два інтерфейси на одному пристрої слухача. Їхня оцінка показує, що FRER через WiFi може досягати обмеженої затримки у 5 мс з надійністю 99,9%. Однак їхня пропозиція та оцінка тісно залежать від їхнього індивідуального прототипу MLO, побудованого на власному обладнанні.1 порівнює згадані роботи з точки зору (i) розглянутих ознак, а саме MLO і FRER, (ii) чи проводилася оцінка, та (iii) відкритої доступності запропонованих фреймворків. Ці дослідження зазвичай проводяться

за допомогою апаратних і програмних платформ, спеціально адаптованих для експериментальних цілей. Альтернативно, деякі використовують власні аналітичні моделі або інструменти симуляції. Натомість ми прагнемо забезпечити відкриту реалізацію об'єднаного стека FRER і MLO у мережевому симуляторі OMNeT++. Це забезпечує відтворюваність наших експериментів і дає змогу дослідницькій спільноті проводити подальші аналізи різних розгортань TSN-WiFi. На відміну від концептуальних досліджень, які досліджують основні проблеми проєктування для забезпечення FRER над бездротовими технологіями, ми представляємо та обговорюємо деталі реалізації та потенційні застереження інтеграції FRER з FRER. Для цього ми використовуємо нашу попередню реалізацію MLO [7] і розширюємо її функціями FER в OMNeT++. Хоча ми враховуємо різні дизайнерські ідеї та рекомендації з [5], [24], наша реалізація дотримується кодових конвенцій OMNeT++ для забезпечення сумісності з іншими протоколами, які підтримує симулятор. Цей підхід дозволяє досліджувати аспекти проєктування, релевантні практичній реалізації комбінованого стеку, зберігаючи при цьому простоту шляхом опускання додаткових елементів стандартизації, визначених у [14]. Нарешті, ми оцінюємо ефективність надлишковості з підтримкою FRER у сценаріях перевантаження та мобільності, які отримали обмежену увагу в попередніх дослідженнях.

4. Огляд дизайну інтеграції FRER-MLO

У нашому дизайні ми поєднуємо розширений MAC-стек із функціями FER. Хоча AP та STA MLD (реалізовані як Ieee8021CbAccessPoint та Ieee8021CbStation відповідно) мають значною мірою схожу архітектуру, вони відрізняються в кількох аспектах, як показано на рис. 3. На рисунку компоненти, виділені червоним кольором і позначені жирним шрифтом, або модифіковані, або нові впровадження для розширення існуючих WiFi-модулів в OMNeT++ з обізнаністю про FRER. Світло-блакитні компоненти (LLC та MAC) повторно використовуються з нашої попередньої роботи [7]. Всі інші модулі походять із симулятора з незначними змінами конфігурації для інтеграції в розширений стек.

Розширений MAC-стек складається з U-MAC та L-MAC. Їхні функціональності коротко описані в розділі 2.2, а деталі реалізації наведені у [7]. У нашій конструкції AP MLD включає додатковий релейний модуль, який об'єднує кілька інтерфейсів на основі правил пересилання та специфікацій протоколу. Для інтерфейсів 802.11be цю функцію переважно виконує U-MAC.

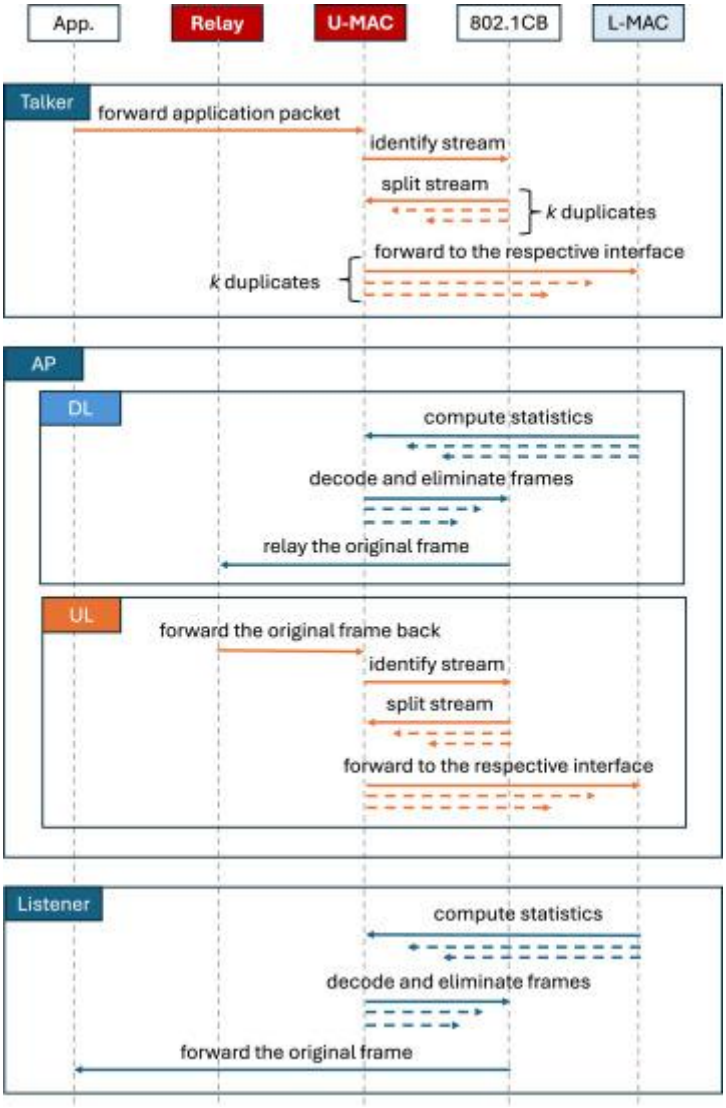


Рис. 4. Діаграма послідовності для комунікації з підтримкою FRER.

Функції FRER реалізовані як окремий рівень 802.1CB. Через uplink (UL) і downlink (DL) стек викликає різні функції у певній послідовності, як описано в розділі 2.1. Ми свідомо уникали змін на рівні 802.1CB, щоб мінімізувати зміни симулятора, вирішивши проблеми сумісності в навколишніх (червоних, жирних) модулях.

На основі компонентів, показаних на рис. 3, рис. 4 ілюструє спрощену послідовність обробки кадрів для комунікації між STA, що говорить і слухач, а також точку доступу.

На стороні talker рівень застосування (тобто будь-який рівень вище MAC) генерує пакети і пересилає їх до U-MAC. Ці пакети потім передаються до модуля 802.1CB для ідентифікації потоку. Якщо вони належать до потоку з підтримкою FRER, вони дублюються у Потоки учасників та кодування. Отримані пакети повертаються до U-MAC і пересилаються на інтерфейси L-MAC для передачі.
Коли кадри FRER отримують до точки доступу, їх спочатку надсилають до U-MAC для обчислення відповідних метрик і статистики. Кадри потім декодуються у членові потоки та об'єднуються в оригінальний потік за допомогою модуля 802.1CB. Отриманий кадр передається реле, яке пересилає його на відповідний наступний шар, зазвичай U-MAC для кадрів 802.11be. Для передачі UL повторюється той самий процес, що й на стороні розмовника. Варто зазначити, що учасники потоки об'єднуються під час DL, а потім знову розділяються для UL. Це дозволяє гнучко конфігурувати FRER на різних бездротових вузлах. Наприклад, навіть якщо talker STA використовує лише два лінії, точка доступу може масштабувати надлишковість до всіх доступних інтерфейсів після отримання оригінального потоку.

На стороні слухача обробка віддзеркалює потік DL на точці доступу, але об'єднані кадри подаються на рівень застосування, а не ретранслюються далі.
З цією високорівневою архітектурою MLD і загальним MLO-потоком із підтримкою FRER ми детально описуємо реалізацію кожного модуля в наступному розділі.

Впровадження

У нашій попередній роботі ми реалізували MLO, використовуючи модулі 802.11 з INET v4.5.2[2] фреймворк поверх OMNeT++ v6.0.3 [7]. У цій роботі ми розширюємо цю реалізацію, інтегруючи існуючі функції FER, доступні в той самий фреймворк.

OMNeT++ розрізняє два типи модулів: вихідні файли (C++) та файли опису мережі (NED). Вихідні файли визначають основну логіку та поведінку алгоритмів і протоколів, тоді як файли NED описують складні модулі, що складаються з різних компонентів і підмодулів протоколу. Для підтримки обміну інформацією поза межами контролю та пакетів даних OMNeT++ також використовує *теги*. Це внутрішні анотації, доступні між модулями, але не присутні в реальному мережевому трафіку.

У цьому розділі окреслено основні артефакти нашого інтегрованого дизайну FRER-MLO, детально описуючи відповідні модулі OMNeT++, параметри конфігурації та їхні функціональні ролі, як показано у Деякі компоненти є суто складеними (тобто визначаються лише через файли NED), тоді як інші містять додаткові функції для підтримки функцій MLO або FER. Таблиця також показує, чи використовується кожен компонент у точці доступу, STA або обох.

Функції FRER

Починаємо з презентації функцій FER, оскільки їхні конфігурації також релевантні для інших компонентів стеку протоколів. Ці функції інкапсулюються в одному шарі IEEE 802.1CB (див. рис. 3), реалізованому як складений модуль Ieee8021rLayer. Цей рівень організований у два основні підрівні: протокольний рівень і рівень політики.

Протокольний рівень (Ieee8021rProtocol[3]) забезпечує функції вставки та розбору R-TAG у кадрах FER. Він складається з двох основних компонентів: вставки заголовків і перевірки заголовків. Вони не потребують додаткової конфігурації і можуть використовуватися з їхніми стандартними налаштуваннями.

Вставка заголовка.

Цей компонент (Ieee8021rTagEpd-HeaderInserter) створює та впроваджує R-TAG у UL-кадри та кодує номер послідовності, реалізуючи функцію кодування послідовності FRER. R-TAG визначаються як Ieee8021rTagEpdHeader і вставляються на початку пакета. Вставка заголовка вставляє послідовний номер, наданий шаром політики (див. розділ 5.1.2). Цей номер передається через тег SequenceNumberReq.

Перевірка заголовка.

Кадри DL спочатку передаються до перевірки заголовка (Ieee8021rTagEpdHeaderChecker) на рівні 802.1CB для зчитування вбудованого послідовного номера з R-TAG. Перевірка заголовків виконує лише витягування послідовного номера і не обробляє відновлення. Натомість він генерує новий тег SequenceNumberInd і пересилає декодований номер наступним компонентам FER. Одночасно він видаляє R-TAG з кадру.

Рівень політики (StreamPolicyLayer) охоплює основні функції FER: ідентифікацію потоків, генерацію послідовностей, розділення потоків і відновлення послідовностей. Вона включає кілька інших підмодулів, які виконують згадані функції. Зверніть увагу, що ці функції також групуються під складними модулями, які опущені в наступному описі для простоти.

Ідентифікатор потоку.

Цей модуль обробляє UL-кадри для ідентифікації потоків та генерації послідовних номерів. Він реалізований у модулі StreamIdentifier. У симуляторі ідентифікація потоку не суворо дотримується стандартного методу FER, який зазвичай використовує MAC-адреси джерела та/або призначення та VLAN ID. Натомість він підтримує гнучкі вирази співставлення, які можуть включати IP-поля, порти TCP/UDP та інші параметри для асоціювання пакетів із потоками. Коли пакет збігається з налаштованим виразом, функція генерації послідовності присвоює відповідний номер послідовності. Якщо потік вже відомий, послідовний номер збільшується; інакше все починається з нуля. Призначений номер послідовності потім інкапсулюється у тег SequenceNumberReq, який пізніше конвертується у R-TAG. Якщо пакет уже містить тег StreamReq (наприклад, DL-пакет, переданий через точку доступу), він пересилається без зміни існуючого номера послідовності. Модуль має бути налаштований зі списком потоків, кожен із яких визначений ім'ям потоку (потік) та відповідним виразом (packetFilter). Приклад конфігурації NED наведено нижче. У цьому випадку модуль позначає UDP-пакети портом призначення 5000 як такі, що *належать потоку1*, і дозволяє нумерацію послідовності для послідовних

пакетів. Щоб вимкнути FRER на вузлі, достатньо пропустити відображення потоків у модулі StreamIdentifier.

В UL ідентифіковані потокові пакети пересилаються до розгалужувача потоків (StreamSplitter), який визначає рівень надлишковості. Він створює кілька членських потоків (див. розділ 2.1), реплікуючи оригінальні пакети додатків відповідно до налаштованої резервності. Розділення потоків, а отже і реплікація кадрів, вимагає налаштування у файлі NED ідентифікатора потоку, як показано нижче. Наприклад, пакети, підібрані *stream1*, двічі реплікуються у потоки учасників *stream1.1* та *stream1.2*. Оригінальний пакет відкидається, а пакети без тегу StreamReq ігноруються

Репліковані пакети передаються через потоковий енкодер (StreamEncoder). Незважаючи на свою назву, цей компонент не виконує *кодування послідовностей*, але гарантує, що пакети містять VLAN ID та пріоритетну кодову точку (PCP) залежно від його конфігурації. Потоковий енкодер не використовується активно у нашій конструкції, оскільки значення VLAN і PCP не є строго обов'язковими для WiFi, на відміну від інших протоколів TSN. Натомість вставка заголовка обробляє кодування послідовного номера відповідно до ідентифікатора потоку. Відповідно, StreamEncoder залишається неналаштованим у наших експериментах, але може бути активований у налаштуваннях з підтримкою VLAN.

Потоковий декодер.

У DL прийняті кадри спочатку обробляються потоковим декодером (StreamDecoder). Подібно до ідентифікатора потоку в UL, він виконує ідентифікацію потоку, але з меншою кількістю параметрів. Це включає перевірку MAC-адрес джерела та призначення, значень VLAN і PCP, а також приймального інтерфейсу, який є критично важливим для MLO. Модуль зіставляє отримані кадри з членськими потоками на основі інтерфейсів, призначених цим потокам. У наступній конфігурації модуль налаштований так, щоб мічати будь-який пакет, отриманий на інтерфейсі *mlo-mac1*, ім'ям *потоку stream1.1* при відповідності заданій адресі призначення. Цей учасник потім об'єднується з основним потоком шляхом злиття потоків

Об'єднання потоків.

Нарешті, об'єднання потоків (StreamMerger) виконує відновлення послідовностей для усунення дублікатів пакетів. Він забезпечує SRF, подібний до VRA, який зберігає отримані номери послідовності для кожного основного потоку (не для учасників). За замовчуванням він відстежує останні 10 кадрів. Кожен вхідний кадр перевіряється за збереженими номерами послідовності; дублікати видаляються, а нові послідовні номери надсилаються додатку та оновлюються буфер SRF. Об'єднання потоків має бути налаштоване так, щоб об'єднати учасники потоків у основний потік. Ідентифікатори потоків-учасників, наприклад, імена у форматі рядків, призначаються декодером потоку, як описано вище. SRF виконується після побудови основного потоку. Приклад конфігурації для об'єднання *потоку 1.1* і *потоку 1.2* у *потік 1* наведено нижче

Щоб видалити R-TAG після вилучення, модуль StreamMerger має бути налаштований з порожніми цільовими потоками (*stream1*) на слухачі.

У розширеному MAC-шарі ми реалізуємо новий компонент U-MAC з підтримкою FRER, тоді як L-MAC здебільшого повторно використовується з [7], за винятком незначних модифікацій у LLC.

U-MAC (Ieee8021CbUMac) координує використання базових каналів для пересилання реплікованих пакетів на основі налаштованої резервності. Це вимагає гнучкого відображення потоку в інтерфейс, що дозволяє будь-який із Комбінації поміж доступні посилання на STA або AP MLD. Крім того, U-MAC має бути налаштований між проміжними дротовими або бездротовими мостами, коли необхідно перерозподілити потоки. Інші функції, окрім реплікації, такі як видалення кадрів, відновлення послідовностей і злиття потоків, повністю виконуються шаром 802.1CB.

Ключовим артефактом U-MAC є нова таблиця пересилання MLO. На відміну від традиційної таблиці пересилання MAC, яка відображає MAC-адреси призначення з інтерфейсами, наша таблиця пересилання (ForwardingTable), орієнтована на FRER, відображає потоки на конкретні WiFi-інтерфейси.[4] Це дозволяє U-MAC доповнювати розділення потоків, перенаправляючи членські потоки на

призначені інтерфейси. Наприклад, наступна конфігурація передає кадри *потоку 1.1* у L-MAC *mlo-lmac1*, а фрейми *потоку 1.2 — до mlo-lmac2*. Зверніть увагу, що призначення потоку на інтерфейс також можна безпосередньо реалізувати в модулях FER, але ми прагнемо максимально використовувати функції FRER незалежно від логіки рівня зв'язку.

U-MAC з підтримкою FRER вводить модифіковану логіку обробки пакетів порівняно з оригінальним U-MAC, описаним у [3]. Коли STA надсилає пакет, U-MAC спочатку перевіряє наявність R-TAG, вставленого шаром 802.1CB. Якщо такого заголовка не знайдено, пакет пересилається назад на ідентифікатор потоку для обчислення (див. рис. 3(b), помаранчевий рядок на UL). Пакет потім послідовно проходить через відповідні функції FRER і повертається до U-MAC лише якщо він пов'язаний із потоком. У цьому випадку він має заголовок R-TAG разом із тегом StreamReq. Пакети, пов'язані з потоками-членами FER, пересилаються на призначені інтерфейси, як налаштовано в новій таблиці пересилання. Пакети, які не належать до жодного потоку, мають видалений R-TAG і передаються через мережевий інтерфейс, налаштований у U-MAC за замовчуванням.

Точки доступу також перевіряють кадри на наявність R-TAG, а також тегів StreamInd і SequenceNumberInd (див. рис. 3(a)). Ці теги існують у UL-фреймах, якщо вони отримані з STA з підтримкою FRER раніше. Потім їх конвертують у відповідні аналоги — StreamReq і SequenceNumberReq — і пересилають назад на рівень 802.1CB для розділення потоків і кодування. Подібно до передачі UL у STA, кадри нарешті перенаправляються на відповідні інтерфейси відповідно до конфігурації таблиці пересилання в U-MAC. Для кадрів без FRER точка доступу пересилає пакети через інтерфейси, на яких вони були отримані, відповідно до базової логіки MLO, описаної в [7].

У L-MAC (Ieee8021LInterface) ми модифікуємо лише підмодуль LLC на стороні AP, який називається порталом (Ieee80211CbPortal). Ця модифікація забезпечує сумісність для співіснуючого FRER і не-FRER трафіку. Зокрема, модифікований портал переставляє заголовок Ethernet MAC і R-TAG, щоб забезпечити правильну

обробку та видалення R-TAG шаром 802.1CB за потреби. Сам MAC-модуль (Ieee8021LMAC) разом із його підкомпонентами, відповідальними за доступ до каналів і конфлікт, залишився незмінним порівняно з оригінальною реалізацією 802.11 в INET.

Важливо зазначити, що стандартний рівень LLC у стеку WiFi виконує кодування дискримінації протоколів LLC (LPD). Однак фрейми FRER відрізняються полем EtherType, що робить кодування протоколу EtherType (EPD) більш доцільним вибором. Наша модифікація порталу полегшує використання заголовків у стилі EPD (наприклад, R-TAG) у середовище LLC на основі LPD. У результаті цей дизайн підтримує сумісність з іншими проєктами OMNeT++, які базуються на стандартних конфігураціях. Для детального обговорення відмінностей між EPD/LPD ми рекомендуємо зацікавленим читачам презентацію Робочої групи з обслуговування IEEE 802.1 [28].

Нарешті, у точці доступу ретрансляційний модуль (Ieee8021CbRelay) направляє отримані кадри на відповідні вихідні інтерфейси. У нашому дизайні ми не використовуємо нативну функцію ретрансляції цього модуля, оскільки вибір інтерфейсу повністю здійснюється U-MAC. Оскільки реле спочатку видаляє всі теги та заголовки, які зазвичай не використовуються у WiFi-фреймах, ми також модифікували цей модуль, щоб зберегти специфічні для FRER теги, а саме StreamInd і SequenceNumberInd.

У цьому розділі ми представляємо результати оцінки для аналізу інтеграції FRER-MLO та її переваг у сценаріях перевантаження та мобільності.

Експериментальне налаштування

Ми проводимо оцінку на ноутбуці з 16 процесорами (2,7 ГГц) і 32 ГБ пам'яті. Як зазначено в Розділі 5, ми використовуємо OMNeT++ v6.0.3 та INET v4.5.2, у яких реалізовано наш фреймворк. У всіх експериментах ми використовуємо MLD з двома інтерфейсами, що працюють на частотах 2,4 ГГц і 5 ГГц.[5] Кожен інтерфейс налаштований на різний бітрейт — 52 та 130 , щоб оцінити вплив асиметричних зв'язків на резервність. Для моделювання каналів ми переважно використовуємо

стандартні параметри симулятора. Усі відповідні конфігурації наведені в Таблиці 3.

Наша мережева модель складається з до 24 стаціонарних і мобільних STA разом із точки доступу в межах 60 м Площа 60 м. Мобільні вузли слідують моделі мобільності випадкових точок маршруту з різною швидкістю. Ми використовуємо UDP-додаток для генерації трафіку, відправляючи пакети по 1000 байт протягом 10 секунд. Додаток генерує пакети з фіксованою швидкістю для повного використання каналу 2,4 ГГц з бітрейтом 52 , що гарантує, що MLD не зазнають просідань кадрів через обмежений розмір черги. Це дає ефективне навантаження приблизно 30 за заданими параметрами симуляції, головним чином через накладні витрати на доступ до каналу, такі як час відходу, міжкадрові інтервали та кадри ACK. Коли присутнє кілька STA відправника, кожен запускає окремий UDP-додаток. У таких випадках 30 навантаження ділиться порівну між ними; наприклад, при десяти STA кожен передає з постійною швидкістю 3 . У всіх сценаріях оцінки MLD виконують EDCA на основі конфлікту незалежно на кожному зв'язку. Кожен експеримент триває 15 с, при цьому UDP-трафік передається між ними .

У нашій оцінці ми розглядаємо сім сценаріїв, наведених у Таблиці 4. По-перше, у сценарії 0 ми перевіряємо нашу реалізацію, перевіряючи її відповідність опису протоколу, наведеному в розділі 4 і ілюстрованому на рис. 3. У сценаріях 1–4 ми аналізуємо поведінку та оцінюємо продуктивність інтеграції FRER-MLO за різних умов відмови у простій топології, показаній на рис. 5. Ці сценарії охоплюють відмови інтерфейсів 2,4 ГГц і 5 ГГц, які відбуваються або на STA відправника, або на точці доступу, незалежно від несправності. У сценарії 5 ми розглядаємо переваги резервування при сценаріях перевантаження, що включають кілька STA. Нарешті, у сценарії 6 ми оцінюємо його ефективність за умов мобільності. У сценаріях 1–4 один відправник передає UDP-трафік, який повністю використовує канал 2,4 ГГц. У сценаріях 5 і 6, де присутнє кілька станцій, кожен відправник передає пропорційне навантаження, щоб уникнути перевантаження каналу, як

описано в попередньому розділі. Конфігураційні файли для всіх сценаріїв також надаються нашою відкритою реалізацією.

У таких сценаріях ми використовуємо поєднання одноканалних операцій (SLO) STA та MLD. У SLO STA можуть використовувати лише одне з'єднання, або на 2,4 ГГц, або на 5 ГГц. Для MLD ми використовуємо два режими MLO:

Режим FRER передає кадри надлишково через налаштовані лінії

Режим агрегації посилань рівномірно розподіляє кадри між зв'язками. Це підвищує ефективність каналу, але не має переваг надійності, що є резервованістю.

Нарешті, ми повідомляємо такі показники ефективності:

Goodput означає кількість *унікальних* пакетів, що доставляються за секунду. Ми використовуємо це замість пропускної здатності, щоб врахувати накладні витрати на дублювання.

Коефіцієнт доставки пакетів — це співвідношення пакетів, отриманих у пункті призначення, до тих, що спочатку були створені на джерелі. Це вимірюється на рівні застосування, не враховуючи надлишкові кадри та повторні передачі.

Затримка вимірюється від початку до кінця — від U-MAC відправника до U-MAC отримувача. Він включає затримки в черзі та доступ до каналу на L-MAC, а також затримку поширення через бездротове середовище.

Jitter вимірює середню різницю затримки між послідовними кадрами. Він відображає зміну затримки з часом і очікується, що залишатиметься низьким і стабільним у надійному зв'язку.

Нормалізоване зниження затримки (NLR) кількісно оцінює покращення затримки, досягнуте на одиницю накладних витрат на надлишковість у FRER порівняно з SLO. Він виражає зменшення затримки (у мілісекундах) для кожного 1% надлишкового трафіку і обчислюється наступним чином:(1)У формулі, і позначає середню затримку SLO STA та MLD з підтримкою FRER, виміряних у певному експерименті відповідно. Аналогічно і представляють кількість доставлених кадрів у відповідних експериментах, причому останній також включає дублікати кадрів.

Зверніть увагу, що NLR можна обчислити за різними метриками затримки, такими як середня або максимальна затримка, а також джиттер, як наведено в наступних розділах. Нормалізація за допомогою надлишкових витрат застосовується, щоб зробити NLR незалежною від абсолютної кількості пакетів, що безпосередньо залежить від тривалості експерименту та моделі трафіку.

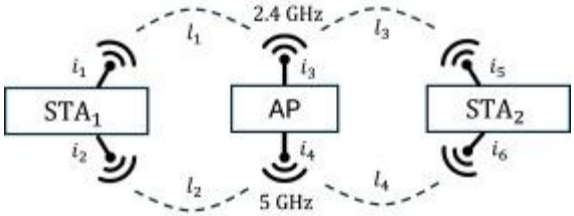
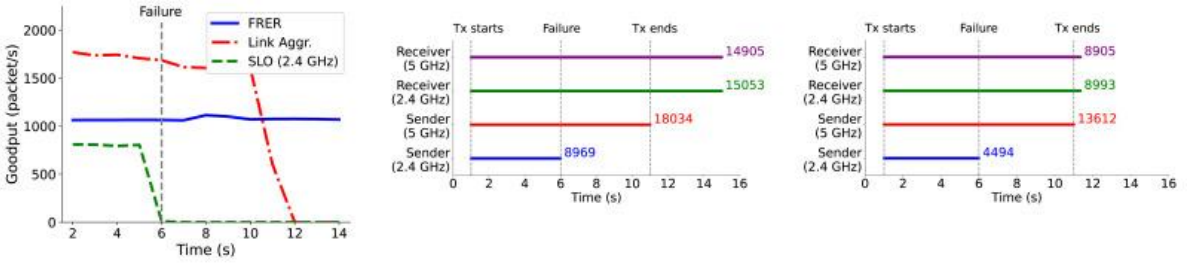


Рис. 5. Базова топологія розглядається у сценаріях 0-4.

Спочатку ми представляємо сценарій валідації, який ілюструє кроки наскрізної доставки одного UDP-пакета між відправником і отримувачем, відповідно до опису протоколу в Розділі 4. Ці кроки відбуваються як *події* в дискретному симуляторі подій OMNeT++, де кожна подія, така як ідентифікація потоків, кодування послідовних номерів і дублювання кадрів, планується в *час симуляції* та виконується *в реальному* часі. Рис. 6 показує ці події (точки), що відбуваються у відправника (верхній жовтий), AP (посередині, зеленому) та отримувачі (знизу, синій) у реальному часі, з анотаціями назв подій та відповідними компонентами.

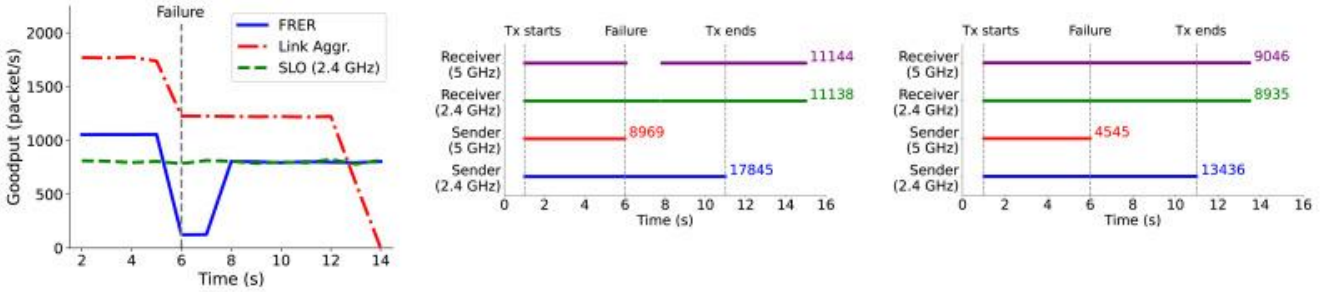
У відправника U-MAC пересилає пакет додатку модулю FRER для ідентифікації потоку та розділення. Два дублікати потім проходять через кодування потоку та вставку заголовка. Після приєднання R-TAG U-MAC надсилає їх на L-MAC двох інтерфейсів, показаних на рисунку як події U- до L-MAC (1/2). На точці доступу обробка кадрів починається після прийому. Після отримання першого дубліката (L-MAC Rx (1)) кадр проходить перевірку заголовка, декодування потоків і об'єднання для перевірки, чи вже надійшов інший кадр з таким самим номером послідовності. Якщо ні, кадр проходить через *реле* точки доступу і пересилається на U-MAC. Потім він дублюється знову і передається через L-MAC точки доступу (L-MAC Tx (1/2)). Коли приходить другий дублікат (L-MAC Rx (2)), він відкидається шляхом злиття потоків, показаний червоною крапкою (Stream

Merger (X)). Нарешті, у приймача зберігається перший дублікат (Stream Merger (R)), тоді як другий виключається (Stream Merger (X), червона крапка). Загалом, ця хронологія безпосередньо відповідає послідовності комунікації на рис. 4 і підтверджує правильну поведінку нашої реалізації.



(a) Goodput over time. (b) Tx and Rx timeline in FRER mode. (c) Tx and Rx timeline in link aggregation mode.

Рис. 7. Сценарій 1 – Відмова інтерфейсу відправника на частоті 2,4 ГГц (при).



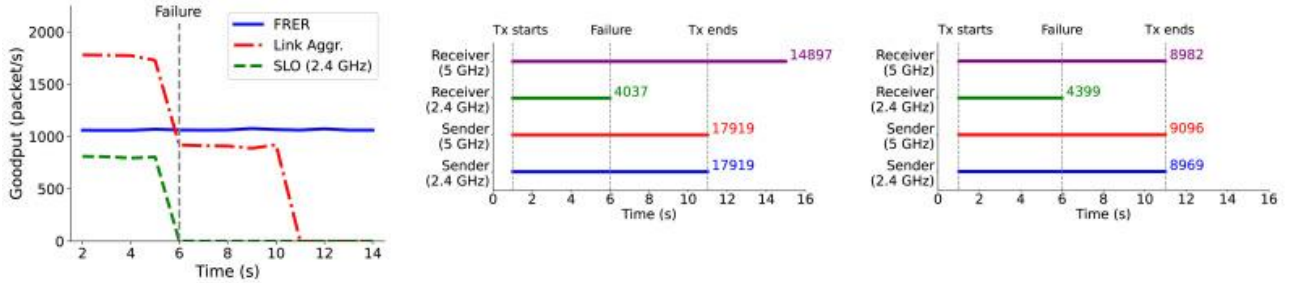
(a) Goodput over time. (b) Tx and Rx timeline in FRER mode. (c) Tx and Rx timeline in link aggregation mode.

Рис. 8. Сценарій 2 – Відмова інтерфейсу відправника на частоті 5 ГГц (при).

У цьому розділі представлено результати перших чотирьох сценаріїв. Наша основна мета — аналізувати поведінку бездротового FRER у умовах відмови. У всіх сценаріях ми використовуємо топологію, показану на рис. 5. і призначені як відправник і отримувач відповідно. У кожному сценарії вводиться різна несправність інтерфейсу в .

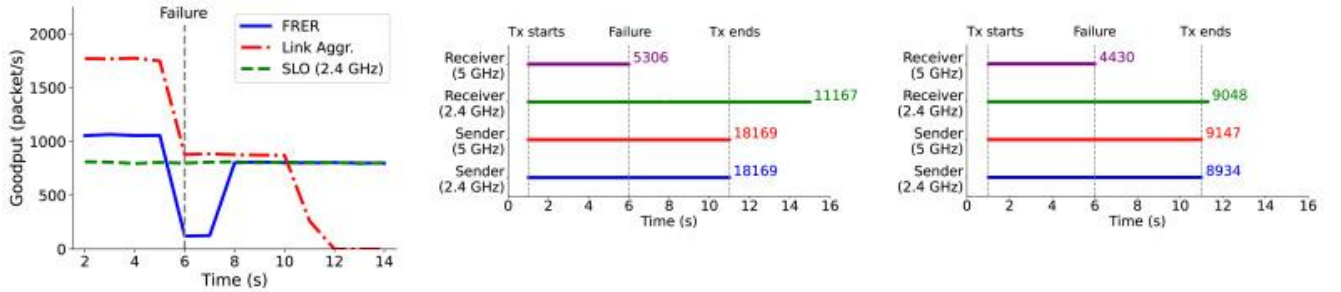
Рис. 7 ілюструє аналіз сценарію 1, у якому (2,4 ГГц) (тобто повільніший інтерфейс цього STA) спонтанно виходить з ладу на . Зокрема, на рис. 7(a) показано корисність з часом для SLO та різних режимів MLO. У цій схемі режим FRER (синій, суцільний) зберігає стабільну продуктивність після збою лінкації, але має нижчий гудпут через надлишкові витрати. Проте він перевершує SLO (зелений, пунктирний), оскільки надлишковість компенсує поодинокі латентні або помилкові кадри. Режим агрегації посилань (червоний, пунктирно-пунктерний) досягає найвищого гудпуту, використовуючи одночасно 2,4 ГГц і 5

ГГц каналів. Після відмови він зазнає лише незначного падіння. Однак пропускна здатність залишкового 5 ГГц каналу достатня для передачі всього трафіку, який потім продовжує розподілятися по обох каналах у точці доступу до зупиняє передачу на . Для порівняння, SLO падає до нуля одразу після єдиного доступного інтерфейсу Не вдається. Нарешті, режим FRER продовжує передавати довше (тобто довшу синю та суцільну лінію), оскільки він надсилає приблизно вдвічі більше кадрів. Ці кадри ставляться в чергу на L-MAC і передаються після конфлікту каналу.



(a) Goodput over time. (b) Tx and Rx timeline in FRER mode. (c) Tx and Rx timeline in link aggregation mode.

Рис. 9. Сценарій 3 – Відмова інтерфейсу точки доступу на частоті 2,4 ГГц (на AP).



(a) Goodput over time. (b) Tx and Rx timeline in FRER mode. (c) Tx and Rx timeline in link aggregation mode.

Рис. 10. Сценарій 4 – Відмова інтерфейсу точки доступу на частоті 5 ГГц (на AP).

Для детальнішого аналізу на рис. 7(b) і 7(c) показано часові рамки передачі кадрів (відправник 2,4 ГГц і 5 ГГц, сині та червоні лінії) та прийом (приймач 2,4 ГГц і 5 ГГц, зелені та фіолетові лінії) для режимів агрегації FRER та каналу відповідно.[6] Наприкінці кожного рядка ми також анотуємо кількість кадрів, надісланих або отриманих протягом відповідного часового інтервалу. На обох рисунках передачі на одному інтерфейсі (Sender 5 GHz, синій) зупиняються після відмови і продовжуються лише на іншому (Sender 2.4 GHz, червоний). Хоча точка доступу отримує лише одну копію кожного UDP-пакета від Після відмови пакети все

одно реплікують у два потоки для стійкості до відмов і до . Внаслідок цього приймач у режимі FRER отримує значно більше кадрів, ніж у режимі агрегації каналів, що спостерігається за загальною кількістю кадрів на каналах приймача 5 ГГц і 2,4 ГГц (фіолетові та зелені лінії).

Підсумовуючи, сценарій 1 підтверджує стабільну продуктивність FRER у базовому сценарії відмови каналу, а також його накладні витрати порівняно з агрегацією каналів, яка надає перевагу ефективності над надмірністю.

На рисунку 8 наведено аналіз сценарію 2, де (5 ГГц) (тобто швидший інтерфейс цього STA) не працює. Результати подаються у тому ж форматі, що й Сценарій 1. На рис. 8(a) режим агрегації посилань демонструє значне зниження гудпутту порівняно зі сценарієм 1, оскільки він більше не може використовувати швидше посилання. Відповідно, кадри накопичуються в черзі L-MAC на з'єднанні 2,4 ГГц. SLO залишається неушкодженим, оскільки передає виключно через канал 2,4 ГГц. У режимі FRER ми спостерігаємо раптове падіння гудпутту після відмови, що руйнує очікування безшовної резервності. Це спричинено цікавим явищем, яке раніше обговорювалося у [2], поясненому нижче.

Коли FRER працює по неперетинних і асиметричних шляхах, наприклад, зв'язках з різною швидкістю, підключених до однієї точки доступу, кадри, що передаються по швидшому каналу, послідовно першими прибувають до вузла з'єднання (точки доступу). Внаслідок цього дублікати кадрів, що приходять пізніше з повільнішого зв'язку, відкидаються. Якщо швидший зв'язок не працює, кадри з повільнішого не будуть переадресовані, доки їхні номери послідовності не наздоженуть останню послідовність, отриману на тепер уже невдалому швидшому зв'язку. Ця поведінка чітко видна на рис. 8(b). Між , точка доступу відкидає всі пакети, надіслані по повільнішому каналу (відправник 2,4 ГГц, синій); тому на таймлайні приймача на частоті 5 ГГц (фіолетовий) не з'являються нові кадри. У цей час переадресуються лише кадри, які вже присутні в черзі передачі точки доступу . Це пояснює низький, але ненульовий гудпут, спостеріганий на рис. 8(a), а також безперервність прийому на приймачі 2,4 ГГц (зелений) на рис. 8(b) після відмови.

Рис. 8(c) показує, що загальний час завершення прийому довший, ніж у Сценарії 1. Це прямий результат зменшеного гудпутта, що підтверджує спостереження на рис. 8(a).

Загалом, Сценарій 2 підкреслює важливість ретельного вибору посилань при налаштуванні FRER. Оскільки MLD STA може асоціюватися лише з однією точкою доступу за чинним стандартом WiFi, неможливо налаштувати шляхи з неперетинним вузлом для резервування. Однак це обмеження можна вирішити у WiFi 8, який вводить підтримку багатоточної координації [29]. Щоб пом'якшити ефекти асиметрії, можна віддавати перевагу кільком каналам із подібною пропускною здатністю та швидкістю, таким як канали в одному частотному діапазоні, порівнянні частотні діапазони або схеми модуляції з еквівалентними характеристиками пропускної здатності.

На рисунку 9 наведено аналіз сценарію 3, де точки доступу (тобто повільнішого інтерфейсу точки доступу). Цей сценарій вводить дві ключові відмінності порівняно з попередніми: По-перше, невдача спричиняє втрату зв'язку точки доступу через два лінії, і (див. рис. 5), що фактично призводить до багатозв'язкової відмови. По-друге, точка доступу стає вузьким місцем, оскільки відправник продовжує використовувати кілька каналів, а точка доступу залишається лише з одним робочим інтерфейсом. Вплив цих відмінностей ілюструється на рис. 9(a). У режимі агрегації каналів відправник продовжує передавати пакети через доступні інтерфейси навіть після відмови на точці доступу. Однак кадри, що надсилаються через інтерфейс 2,4 ГГц () або ставляться в чергу в L-MAC, або губляться, оскільки більше не отримують точки доступу. Це призводить до помітного падіння Goodput. Натомість у режимі FRER точка доступу продовжує приймати по одній репліку кожного оригінального кадру через залишковий інтерфейс 5 ГГц і пересилає її на приймач. Це забезпечує безшовну резервність і забезпечує кращу продуктивність, ніж режим агрегації посилань після відмови.

Рис. 9(b) та 9(c) підтверджують таку поведінку. Відправник продовжує передавати через обидва інтерфейси, тоді як точка доступу приймає та пересилає

кадри лише через інтерфейс 5 ГГц (фіолетовий). Одним із можливих способів пом'якшення таких сценаріїв збоїв інтерфейсу є можливість U-MAC відправника обробляти асоціаційні маяки з точки доступу. Якщо маяки не отримані (що вказує на відключення), відправник може припинити пересилання пакетів на уражений інтерфейс. Однак подібні проблеми можуть виникати й за інших умов, таких як сильний шум каналу або збої на стороні прийому на інтерфейсі точки доступу (поки передача залишається функціональною).

На рисунку 10 наведено аналіз сценарію 4, де AP зазнає невдачі. Результати відображають поєднання двох випадків, спостережених у сценаріях 2 і 3. По-перше, у режимі FRER ми спостерігаємо зниження гудпутту через використання асиметричних зв'язків, як це обговорюється у сценарії 2. Одразу після відмови точка доступу отримує дублікати кадрів через інтерфейс 2,4 ГГц (), який він уже переадресував раніше через тепер уже невдалий канал 5 ГГц. Ці надлишкові кадри усуваються між після чого нові кадри пересилаються через . По-друге, у режимі агрегації посилань гудпутт зазнає різкого падіння. Це пов'язано з тим, що U-MAC відправника продовжує передавати на тепер уже нефункціональний інтерфейс точки доступу, як описано у сценарії 3.

Нарешті, Таблиця 5 узагальнює коефіцієнт доставки пакетів SLO і MLO як у режимах агрегації FER, так і в режимах агрегації каналів у різних сценаріях відмов. Зверніть увагу, що ці значення залежать від часу виникнення відповідних відмов. Наприклад, попередня несправність призводить до більшої втрати пакетів протягом усього сценарію. Як показано в результатах, FRER стабільно досягає 100% коефіцієнта доставки, навіть коли гудпут коливається за певних умов (див. сценарії 2 і 4). Натомість режим агрегації каналу втрачає понад 25% пакетів, оскільки відправник не може виявити збої на точці доступу, але продовжує передавати сигнал по робочому каналу. SLO схильний до збоїв, що призводить до повної зупинки доставки пакетів після відмови.

Сценарії заторів

Ми оцінюємо вплив перевантаження мережі, збільшуючи кількість стаціонарних STA до 24. Половина цих вузлів призначена як відправники, а інша половина —

як приймачі UDP-трафіку. Серед них лише одна пара відправник–приймач підтримує FRER; решта STA працюють у режимі SLO, кожен передає по випадково обраному каналу — 2,4 ГГц або 5 ГГц. Зі збільшенням кількості STA очікується посилення конфлікту за канали, що призведе до вищої затримки.

Рис. 11, рис. 12 — результати сценарію 5. Рис. 11 порівнює середню (лінії) та 95-й процентиль (площі) затримку між режимами FRER (синій, суцільний) та SLO (зелений, пунктирний). Для FRER вимірювання відображають затримку від кінця до кінця між парою STA з підтримкою FRER, де для кожного пакета розглядається лише раніше прибуття репліка. Для SLO затримка усереднюється між усіма обмінами пакетами між SLO STA за заданий запуск симуляції. Ми залишаємо фіксоване навантаження трафіку для кожного STA при збільшенні їхньої кількості. Кожен експеримент повторюється 10 разів.

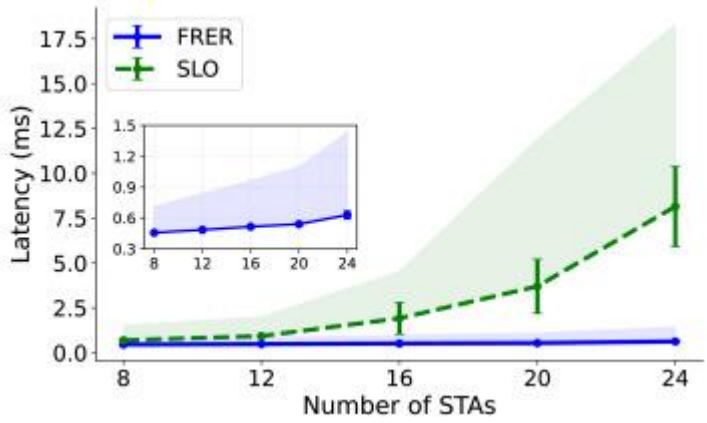


Рис. 11. Сценарій 5 – Затримка у змішаних сценаріях перевантаження MLO та SLO.

Результати на рисунку 11 чітко демонструють, що затримка у режимі FRER залишається майже сталою — близько 1 мс, тоді як SLO STA зазнають швидкого зростання затримки з високою дисперсією, досягаючи до 17,5 мс. Як показано на збільшеному зображенні, наявність надлишкових пакетів у FRER фактично обмежує затримку, навіть при збільшенні конфлікту. Однак, як раніше обговорювалося у сценаріях 1–4, FRER додає додаткові ресурси через реплікацію пакетів. Це не лише марнує пропускну здатність каналу, а й може погіршити перевантаження для співіснуючих SLO STA, погіршуючи їхню продуктивність. Тому режим FRER слід зарезервувати для трафіку з високою критичністю, де

сувора надійність і обмежена затримка є необхідними, що відповідає основним цілям TSN.

Рис. 12 додатково ілюструє нормалізоване зниження затримки (NLR) через найгірші випадки затримки (ліва вісь, червона суцільна лінія) та покращення джиттеру (права вісь, синя пунктирна лінія), що забезпечується надмірністю порівняно зі SLO. Найгірший випадок відповідає затримці 95-го перцентилю, показаній на рис. 11. Ми вважаємо ці два показники репрезентативними для покращень надійності, досягнутих FRER щодо обмеженої та передбачуваної затримки. Як показано на рисунку, як найгірші випадки затримки, так і зниження джитеру стають більш значущими зі збільшенням кількості STA, тобто при більшій перевантаженості. Зокрема, ми спостерігаємо покращення затримки у найгіршому випадку до 0,35 мс на додатковий 1% резервних пакетів у FRER. Така ж тенденція спостерігається і для покращення джиттеру, що свідчить про більш стабільні та надійні затримки зв'язку.

У сценарії 5 ми прагнемо провести попереднє дослідження переваг FRER для низької та передбачуваної затримки, а також продемонструвати це в нашій інтегрованій структурі FRER-MLO. Це можна розширити подальшими експериментами на більш детальних випадках, таких як: (i) збільшення кількості STA з підтримкою FRER (замість однієї пари), більш контрольоване розподілення SLO STA у різних частотних діапазонах (замість випадкового призначення), (iii) зміна умов каналу та (iv) сценарії в приміщенні. Наш фреймворк з відкритим кодом дозволяє моделювати всі ці випадки, і ми також розглядаємо такі експерименти як нашу майбутню роботу.

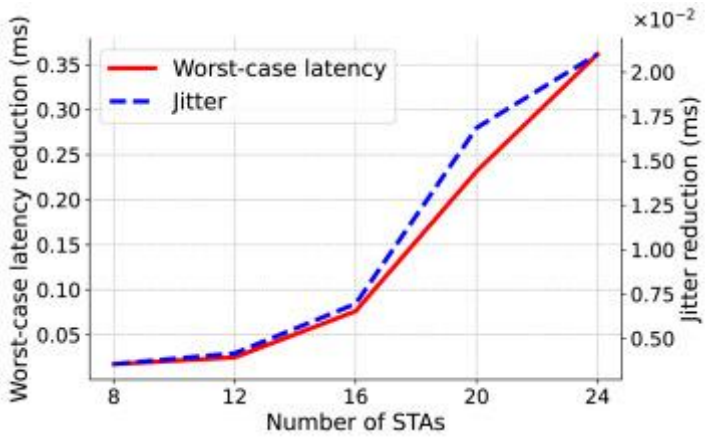


Рис. 12. Сценарій 5 – Нормалізована найгірша затримка та зменшення джиттерів у сценаріях перевантаження. Нормалізація відображає покращення, досягнене на додатковий 1% резервних пакетів, переданих через FRER.

Сценарії мобільності

Нарешті, ми оцінюємо покращення затримки в режимі FRER порівняно з застарілими SLO STA у сценаріях мобільності. У експериментах 16 CTA рухаються відповідно до випадкової мобільності точки маршруту зі швидкістю до 9 на більшій площі 150 м 150 м. Поки низькі швидкості (наприклад, 1) означає людську ходьбу, швидші моделі можуть нагадувати мобільні роботи та автоматизовану керовану мобільність транспортних засобів на великих промислових підприємствах із WiFi-мережами.

Рис. 13, рис. 14 демонструють результати сценарію 6. На відміну від результатів заторів, спостеріганих у сценарії 5, ми спостерігаємо більш стабільне зростання середньої затримки для SLO STA на рис. 13. Однак найгірша затримка на 95-му перцентилі досягає піку гостріше, оскільки зростання мобільності призводить до динамічної зміни заповненості каналу і, відповідно, до більшої конкуренції. Крім того, під час експериментів SLO STA, що працювали на частоті 5 ГГц, були більш вразливими до збільшення відстаней, часто вимагаючи повторної передачі, коли вони виходили за межі ефективного діапазону передачі. Для порівняння, переваги FRER чітко спостерігаються. Він надає кілька можливостей передавати одні й ті ж пакети по двох каналах і може підтримувати стабільне з'єднання, повертаючись до діапазону 2,4 ГГц, коли зв'язок 5 ГГц стає нестабільним.

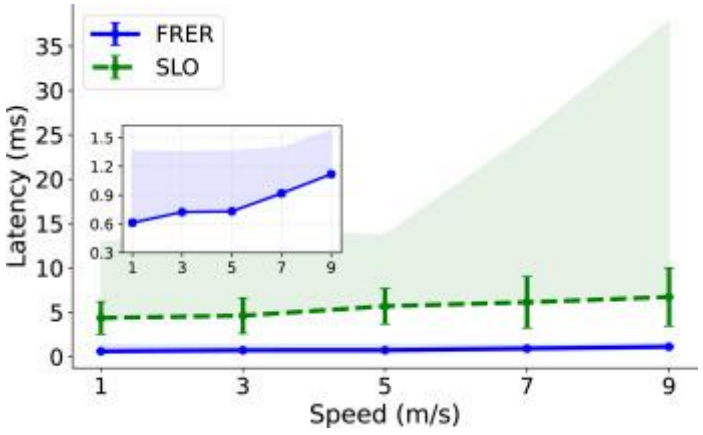


Рис. 13. Сценарій 6 – Затримка в мобільних сценаріях.

Рис. 14 показує дещо відмінні результати NLR порівняно зі сценаріями заторів. Для найгіршої затримки та джитеру покращення більш виражені — до 0,8 мс і на додатковий 1% від надлишкового трафіку відповідно. Наприклад, при 50% надлишковому трафіку, як у нашому сценарії оцінки (тобто подвійне дублювання), зменшення джиттеру становить приблизно 1,85 мс, що є суттєвим для систем із суворими вимогами до затримки 5–10 мс.[7]

7. Відкриті питання та виклики

У цьому розділі ми окреслимо ключові виклики відкритої реалізації та конфігурації.

Складність конфігурації.

Наразі FRER вимагає детальної конфігурації між кількома модулями на кожному вузлі з підтримкою FER. Рідна реалізація FRER в OMNeT++ включає StreamRedundancyConfigurator для автоматизації цього процесу. Однак цей модуль підтримує лише пристрої TSN, оскільки забезпечує конфігурації на основі VLAN та PCP. Активація VLAN і PCP-тегування, а також використання цього конфігуратора в нашій фреймворкці, не лише полегшує масштабовану мережеву симуляцію, а й закладає основу для моделювання гібридних TSN і WiFi мереж із наскрізним резервуванням.

Розмір вікна VRA.

Ще одним критичним параметром конфігурації для FRER є розмір вікна VRA (див. розділ 5.1.2). Налаштування TSN на основі Ethernet зазвичай передбачають два або більше неперетинних шляхів із подібною затримкою. За таких умов достатньо маленького вікна VRA, оскільки дублікати кадрів потрапляють до SRF мосту TSN або слухача, розташованих щільно та послідовно. Натомість бездротові мережі стикаються з повторними передачами та асиметричними зв'язками, що призводить до розходження послідовних номерів одночасно надходящих пакетів. Відповідно, старі кадри можуть бути переадресовані без усунення, оскільки вони потрапляють за межі поточного вікна VRA. У наших експериментах ми встановили розмір вікна на 1000 і помітили, що значення нижче 500 працюють неправильно. Тому цей параметр слід ретельно

налаштовувати відповідно до характеристик мережі. Для отримання додаткової інформації читачі можуть ознайомитися з поточними зусиллями зі стандартизації [30] та альтернативними методами [31].

Індивідуальна функція відновлення.

Для відновлення потоків ми реалізуємо лише SRF вище рівня U-MAC, замість того, щоб розгортати IRF на кожен канал у L-MAC. У мостах TSN IRF усуває дублікати пакетів раніше на приймальному порту та знижує навантаження на мостовий модуль, що особливо корисно проти застряглих відправників. Більш реалістична інтеграція з FRER могла б включити цей підхід, хоча й вимагала б значних змін у сучасному дизайні L-MAC в OMNeT++.

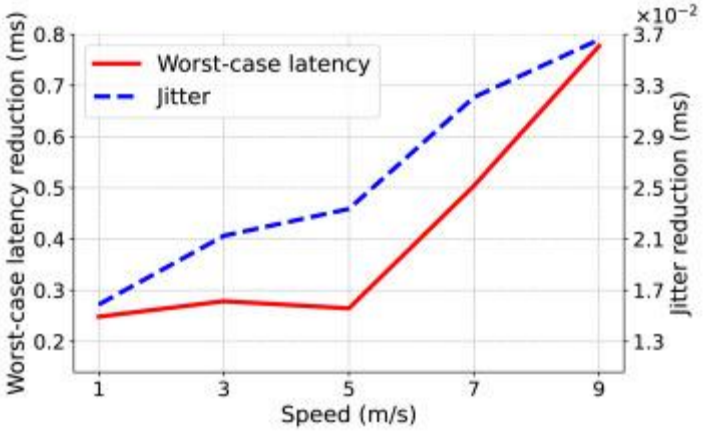


Рис. 14. Сценарій 6 – Нормалізована найгірша затримка та зменшення джитеру у мобільних сценаріях. Нормалізація відображає покращення, досягнене на додатковий 1% резервних пакетів, переданих через FRER.

Висновок

Нова функція багатоз'єднаної роботи (MLO) WiFi 7 дозволяє одночасно використовувати кілька інтерфейсів у діапазонах 2.4, 5 та 6 ГГц. Це може суттєво підвищити ефективність спектра та підвищити надійність у складних умовах бездротового зв'язку. Перспективним підходом до підвищення надійності є впровадження резервування шляхом використання просторової та частотної різноманітності на кількох каналах. Відомий протокол TSN, IEEE 802.1CB Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER), забезпечує механізми гнучкої реплікації та усунення пакетів у дротових Ethernet-мережах, що аналогічно може використовуватися для забезпечення резервування у WiFi.

Відповідно, у цій статті ми представляємо відкритий фреймворк, який інтегрує FRER з MLO у мережевому симуляторі OMNeT++, розширюючи нашу попередню роботу в [7]. Ми розглядаємо кілька викликів впровадження та аналізуємо наслідки адаптації резервування на основі FRER для бездротових мереж. Через кілька сценаріїв відмов інтерфейсу, перевантаження каналів і мобільності ми оцінюємо вплив асиметричних бездротових каналів і нерозділених шляхів, налаштованих для FRER, і пропонуємо потенційні рішення. Ми також демонструємо переваги FRER з точки зору затримки та співвідношення доставки пакетів порівняно з застарілим SLO та іншим режимом MLO — агрегацією лінків. Наші результати показують, що FRER може покращити коефіцієнт доставки пакетів і забезпечити обмежену затримку, хоча й ціною зниження ефективності каналу через резервування.

У майбутньому ми прагнемо підвищити ефективність каналу, застосовуючи техніки відтермінування у FRER, які уникають дублювання передач за сприятливих умов каналу, коли хоча б одна репліка була успішно доставлена. Крім того, ми плануємо дослідити інтеграцію бездротового FRER у гібридні мережі TSN і WiFi, забезпечуючи цілісну наскрізну резервацію як у бездротових, так і в дротових доменах.