

ВПЛИВ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ ВІД BLUETOOTH LOW ENERGY ТА ТЕХНОЛОГІЇ MU-MIMO НА ПРОДУКТИВНІСТЬ МЕРЕЖІ WI-FI

М. І. Волошин, М. В. Олексів

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних обчислювальних машин
E-mail: mykola.i.voloshyn@lpnu.ua, maksym.v.oleksiv@lpnu.ua

© Волошин М. І., Олексів М. В., 2025

Досліджено взаємний вплив технологій Bluetooth Low Energy (BLE) та Wi-Fi 5 у діапазоні 2,4 ГГц та оцінено ефективність технології MU-MIMO за умов такої взаємодії. Проведено експериментальне вимірювання ключових показників продуктивності мережі. Встановлено, що активність BLE негативно впливає на параметри Wi-Fi, призводячи до зниження середньої пропускну здатності TCP в діапазоні від 0,08 % до 11,90 % та збільшення середньої затримки Ping до 21,43 %, залежно від конфігурації каналу. Проаналізовано залежність рівня інтерференції від вибору каналу (1, 6, 11) та його ширини (20/40 МГц). Показано, що технологія MU-MIMO в умовах тестування з одним клієнтом не продемонструвала суттєвого покращення продуктивності чи завадостійкості. Виявлено, що фактори тестового середовища, зокрема відстань до маршрутизатора, можуть значно обмежувати базову продуктивність мережі (до 11–12 Мбіт/с).

Ключові слова: 2,4 ГГц, BLE, Bluetooth Low Energy, FTMS, MU-MIMO, Ping, TCP, Wi-Fi, Zwift, завадостійкість, інтерференція, продуктивність, співіснування, ширина каналу.

Вступ

Бездротові технології стали невід’ємною частиною сучасного інформаційного простору, забезпечуючи гнучкий та зручний доступ до мережевих ресурсів. Діапазон частот 2,4 ГГц є одним з найвикористовуваних для таких технологій, що, однак, призводить до його значного завантаження та виникнення проблем взаємного впливу та співіснування різних стандартів, зокрема Wi-Fi та Bluetooth.

Актуальність цієї проблеми значно зростає у зв’язку зі стрімким поширенням пристроїв Інтернету речей, багато з яких, наприклад, фітнес-трекери та спортивне обладнання, активно використовують технологію Bluetooth Low Energy для обміну даними. Така активність створює додаткове радіочастотне навантаження та потенційні завади для функціонування мереж Wi-Fi, що може негативно позначатися на якості послуг, що надаються користувачам.

Для підвищення ефективності використання радіоканалу у стандарті Wi-Fi 5 була впроваджена технологія MU-MIMO, проте її практична ефективність у сценаріях з одним активним клієнтом за наявності специфічної BLE-інтерференції залишається недостатньо вивченою. Отож дослідження впливу таких BLE-пристроїв на продуктивність Wi-Fi 5 та оцінка ефективності MU-MIMO у цих умовах є важливим науково-практичним завданням, спрямованим на покращення завадостійкості та оптимізацію роботи сучасних бездротових мереж.

Огляд літературних джерел

Ефективне співіснування бездротових технологій у переважаному діапазоні 2,4 ГГц ISM, де масово використовуються Wi-Fi та Bluetooth Low Energy (BLE), є актуальною науковою проблемою через взаємну інтерференцію, спричинену перекриттям спектрів сигналів. Дослідження [1] підкреслює важливість розробки стратегій для забезпечення оптимальної продуктивності обох систем.

Bluetooth Low Energy (BLE) використовує метод стрибкоподібної перебудови частоти (FHSS) в діапазоні 2,4 ГГц, оперуючи 40 каналами по 2 МГц (3 для реклами, 37 для даних), згідно зі специфікацією Bluetooth Core [2]. Сучасні механізми адаптації FHSS в BLE для підвищення завадостійкості аналізуються в [3]. Спортивне обладнання часто використовує стандартизовані BLE профілі, такі як FTMS (Fitness Machine Service), для взаємодії із застосунками, що регламентується Bluetooth SIG [4].

Мережі Wi-Fi в діапазоні 2,4 ГГц використовують канали шириною 20 МГц або 40 МГц відповідно до стандарту IEEE 802.11 [5], що призводить до їх перекриття з каналами Bluetooth та взаємної інтерференції. Це знижує ефективність радіоресурсу, що підтверджується дослідженнями механізмів інтерференції та моделями взаємного впливу [6]. Численні публікації, зокрема експериментальні дослідження [7], демонструють негативний вплив Bluetooth на продуктивність Wi-Fi, виражений у зниженні пропускної здатності та збільшенні затримок [8].

Технологія MU-MIMO, реалізована у стандарті Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac), призначена для збільшення сумарної пропускної здатності мережі шляхом одночасної передачі даних кільком клієнтам. Проте її практична ефективність залежить від кількості активних MU-MIMO-сумісних клієнтів та умов радіоканалу, зокрема інтерференцію, як аналізується в [9]. Дослідження [10, 11] вказують на обмеження MU-MIMO, особливо у разі малої кількості клієнтів. Вплив MU-MIMO на стійкість до специфічних BLE-завад за одного активного Wi-Fi клієнта є актуальним питанням, яке розглядається у цьому дослідженні.

Незважаючи на велику кількість наукових праць, присвячених взаємодії Wi-Fi та Bluetooth, є потреба у більш детальному вивченні впливу сучасних специфічних BLE-застосунків, які характеризуються певними патернами передачі даних. Зокрема, використання фітнес-обладнання, такого як бігові доріжки, що працюють з інтерактивними платформами типу Zwift через профіль FTMS, генерує постійний або дуже частий потік невеликих пакетів даних, характер впливу якого на мережі Wi-Fi може мати свої особливості. Більшість робіт розглядають або загальну інтерференцію від Bluetooth, або вплив інших типів BLE-пристроїв (наприклад, сенсорів з рідкісною передачею даних або аудіопристроїв). Отже, актуальність цього дослідження полягає у кількісній оцінці впливу саме такого специфічного типу BLE-трафіку на продуктивність та стабільність Wi-Fi.

Крім того, хоча технологія MU-MIMO теоретично обіцяє покращення продуктивності, її ефективність значною мірою залежить від сценарію використання. Більшість досліджень ефективності MU-MIMO зосереджена на сценаріях з кількома одночасно активними клієнтами. Практична користь від увімкнення MU-MIMO в умовах одного активного Wi-Fi клієнта, особливо за наявності постійної BLE-інтерференції, є менш дослідженою. Ця праця спрямована на вивчення саме такого сценарію, що дасть змогу оцінити доцільність використання MU-MIMO в поширених домашніх або малих офісних середовищах, де часто є лише один інтенсивно працюючий Wi-Fi клієнт поряд з активними BLE-пристроями. Комплексний аналіз впливу різних каналів Wi-Fi та ширини каналу (20 МГц та 40 МГц) на ці взаємодії також доповнює наявні знання, надаючи більш детальну картину поведінки мережі Wi-Fi 5 за умов специфічної BLE-інтерференції.

Постановка задачі

Аналіз наукових публікацій та стандартів свідчить про актуальність проблеми співіснування Wi-Fi та Bluetooth Low Energy (BLE) у діапазоні 2,4 ГГц. Встановлено, що інтерференція від BLE-пристроїв може суттєво впливати на продуктивність мереж Wi-Fi [12]. Особливої уваги потребує дослідження впливу сучасних BLE-застосунків з характерними патернами трафіку, наприклад,

фітнес-обладнання з профілем FTMS. Ефективність технологій покращення продуктивності Wi-Fi, зокрема MU-MIMO [13, 14], в умовах такої специфічної інтерференції та у поширених сценаріях з одним активним клієнтом, залишається недостатньо вивченою.

Основною проблемою, що розглядається, є кількісна оцінка деградації ключових показників продуктивності мережі Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac/n у діапазоні 2,4 ГГц) під впливом інтерференції від BLE-пристрою (бігової доріжки із застосунком Zwift), а також дослідження ефективності технології MU-MIMO для зменшення цього негативного впливу в умовах одного активного Wi-Fi клієнта.

Метою статті є експериментальне дослідження закономірностей впливу BLE-інтерференції на характеристики пропускної здатності TCP та стабільності (затримка, втрати пакетів) мережі Wi-Fi 5 для різних каналів та ширин каналу, а також оцінка практичної доцільності використання технології MU-MIMO для підвищення завадостійкості у зазначених умовах.

Для досягнення мети поставлено такі завдання: експериментально визначити базові показники продуктивності Wi-Fi 5 (2,4 ГГц, канали 1, 6, 11, ширина 20/40 МГц) без BLE-інтерференції та з вимкненим MU-MIMO; кількісно оцінити зміни цих показників під впливом BLE-інтерференції за вимкненого MU-MIMO; визначити базові показники продуктивності Wi-Fi 5 за увімкненого MU-MIMO (один клієнт) без BLE-інтерференції; кількісно оцінити зміни показників під впливом BLE-інтерференції за увімкненого MU-MIMO; провести порівняльний аналіз ефективності MU-MIMO щодо стійкості до BLE-інтерференції. Очікується, що результати дозволять сформулювати рекомендації щодо оптимізації конфігурацій мереж Wi-Fi 5.

Експериментальний стенд та методика вимірювань

Для досягнення поставленої мети та вирішення сформульованих завдань було розроблено методику та проведено серію експериментальних досліджень. Експерименти проводилися з використанням експериментального стенду та програмних засобів для генерації трафіку та вимірювання показників продуктивності.

Експериментальний стенд містив маршрутизатор Wi-Fi (Xiaomi AX1800), що підтримує стандарт Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac/n) та технологію MU-MIMO. Маршрутизатор було налаштовано для роботи виключно в діапазоні 2,4 ГГц, що дало змогу сфокусуватися на найбільш завантаженому та схильному до інтерференції частотному діапазоні. Під час проведення тестів послідовно встановлювалися канали Wi-Fi 1, 6 та 11, а також дві типові ширини каналу для діапазону 2,4 ГГц: 20 МГц та 40 МГц. Як сервер для тестів пропускної здатності використовувався Ноутбук 1 (Lenovo IdeaPad Gaming I15), під'єднаний до маршрутизатора за допомогою бездротового з'єднання Wi-Fi. Роль клієнтського пристрою, що генерував тестовий трафік та вимірював параметри затримки, виконував Ноутбук 2 (HP EliteBook x360), також під'єднаний до маршрутизатора по Wi-Fi. Важливо зазначити, що під час проведення експериментів відстань між маршрутизатором та клієнтськими ноутбуками була значною (8 м), що могло впливати на загальний рівень сигналу та базову продуктивність.

Джерелом Bluetooth-інтерференції слугувала бігова доріжка (EnergyFIT EF-U12), під'єднана до застосунку Zwift, запущеного на окремому мобільному пристрої (Samsung Galaxy S21 Ultra). Зв'язок між біговою доріжкою та застосунком Zwift здійснювався за протоколом Bluetooth Low Energy (BLE) з використанням стандартизованого профілю FTMS (Fitness Machine Service) [15]. Такий режим роботи характеризується безперервною або дуже частою передачею невеликих пакетів даних, що містять інформацію про швидкість, темп та інші параметри тренування, від доріжки до керуючого пристрою із застосунком Zwift.

Для вимірювання продуктивності мережі використовувалося таке програмне забезпечення: `iperf3` (версія 3.x) для генерації TCP-трафіку [16, 17] та вимірювання максимальної досяжної пропускної здатності, а також стандартна утиліта `ping` операційної системи Windows для вимірювання середньої затримки відповіді (Round Trip Time, RTT) [18, 19] та відсотка втрачених пакетів. Автоматизація процесу тестування, зокрема запуск команд `iperf3` та `ping`, а також збір та попередню обробку результатів, здійснювалася за допомогою спеціально розробленого скрипта на мові Python 3.x.

Дослідження проводилося для двох основних конфігурацій налаштувань маршрутизатора: з вимкненою технологією MU-MIMO та з увімкненою технологією MU-MIMO. У кожній з цих конфігурацій вимірювання проводилися для двох режимів роботи Bluetooth-пристрою: “Baseline”, що характеризувався відсутністю активного Bluetooth-з’єднання бігової доріжки (Bluetooth на доріжці та керуючому пристрої був вимкнений або неактивний), та “BT_Active”, за якого бігова доріжка була під’єднана до застосунку Zwift і активно передавала дані, створюючи BLE-інтерференцію. Кожен унікальний сценарій тестування, що визначався комбінацією каналу Wi-Fi (1, 6, або 11), ширини каналу (20 або 40 МГц), статусу MU-MIMO (вимкнено або увімкнено) та режиму Bluetooth-активності (“Baseline” або “BT_Active”), повторювався 5 разів для забезпечення статистичної достовірності та усереднення результатів.

Основними вимірюваними метриками, що аналізувалися, були: середня пропускна здатність TCP (Мбіт/с), розрахована за результатами 30-секундного тесту iperf3 з ігноруванням перших 3 секунд для стабілізації потоку даних; середня затримка відповіді RTT (мс) та відсоток втрачених пакетів (%), визначені за результатами відправки 50 ICMP-запитів утилітою ping. Зібрані дані агрегувалися, і для кожної конфігурації розраховувалися середні значення вимірюваних метрик. Вплив Bluetooth-інтерференції та технології MU-MIMO на продуктивність та стабільність мережі Wi-Fi оцінювався шляхом порівняння отриманих середніх значень та розрахунку відносних відсоткових змін для різних сценаріїв. Зокрема, відсоткова деградація пропускної здатності TCP (D_{TCP}) розраховувалася за формулою:

$$D_{TCP} = \frac{T_{Baseline} - T_{BT_Active}}{T_{Baseline}} \cdot 100 \%,$$

де $T_{Baseline}$ – середня пропускна здатність у режимі без інтерференції, а T_{BT_Active} – середня пропускна здатність за наявності BLE-інтерференції.

Узагальнені параметри експерименту наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Основні параметри експериментального дослідження

Параметр	Значення
Частотний діапазон Wi-Fi	2,4 ГГц
Канали Wi-Fi	1, 6, 11
Ширина каналу Wi-Fi	20 МГц, 40 МГц
Технологія MU-MIMO	Вимкнено / Увімкнено
Джерело BLE-інтерференції	Бігова доріжка EnergyFIT EF-U12 + додаток Zwift (профіль FTMS)
Режими тестування	“Baseline” (без BLE), “BT_Active” (з BLE)
Інструмент для TCP throughput	iperf3 (версія 3.x)
Тривалість тесту iperf3	30 секунд (з пропуском перших 3 секунд)
Інструмент для Ping	ping (Windows)
Кількість пакетів ping	50
Вимірювані метрики	Середня пропускна здатність TCP, середня затримка Ping, втрати пакетів Ping
Автоматизація	Python 3.x скрипт

Отож описана методика та конфігурація експериментального стенду дали змогу зібрати необхідні дані для кількісної оцінки впливу BLE-інтерференції та технології MU-MIMO на продуктивність мережі Wi-Fi 5 в умовах, наближених до реальних сценаріїв використання.

Результати дослідження

Результати вимірювань за вимкненої технології MU-MIMO узагальнені у табл. 2, де наведено середні значення пропускної здатності TCP, середньої затримки Ping та середнього відсотка втрачених пакетів Ping для кожного тестового сценарію.

Таблиця 2

Середні показники продуктивності Wi-Fi за вимкненої технології MU-MIMO

Канал	Ширина (МГц)	Режим	Середній TCP (Мбіт/с)	Середня затримка (мс)
1	20	Baseline	11,24	3,80
1	20	BT_Active	10,81	4,00
1	40	Baseline	11,27	3,80
1	40	BT_Active	11,00	3,80
6	20	Baseline	11,70	3,00
6	20	BT_Active	10,43	3,60
6	40	Baseline	11,83	3,00
6	40	BT_Active	11,35	3,00
11	20	Baseline	11,81	2,80
11	20	BT_Active	10,67	3,40
11	40	Baseline	11,78	3,20
11	40	BT_Active	11,44	3,00

Аналіз даних показує, що базова пропускна здатність TCP (режим “Baseline”) за вимкненого MU-MIMO коливається в межах від 11,24 Мбіт/с до 11,83 Мбіт/с. Перехід від ширини каналу 20 МГц до 40 МГц практично не вплинув на базову пропускну здатність, вказуючи на інші лімітуючі фактори.

Під час активації Bluetooth-інтерференції (режим “BT_Active”) спостерігається зниження пропускної здатності TCP для всіх досліджуваних каналів та ширин. Найсуттєвіше падіння зафіксовано для каналу 6 за ширини 20 МГц (-10,85 %) та для каналу 11 за ширини 20 МГц (-9,65 %). Для каналу 1 зниження було найменшим (від -3,83 % до -2,40 %). Графічне представлення цих залежностей наведено на рис. 1.

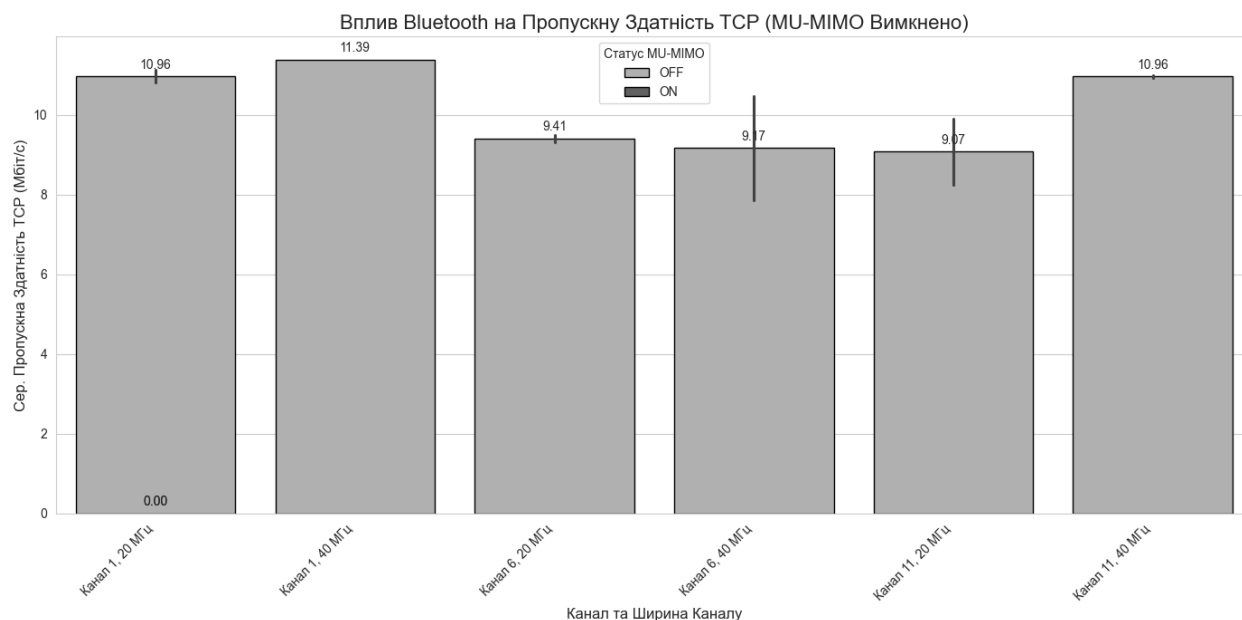


Рис. 1. Вплив Bluetooth на TCP (MU-MIMO вимкнено)

Щодо середньої затримки Ping, вона переважно зростала під час активації Bluetooth, особливо для ширини каналу 20 МГц на каналах 6 (+20,00 %) та 11 (+21,43 %), що свідчить про погіршення стабільності відповіді мережі. На каналі 1 (40 МГц) та каналі 6 (40 МГц) затримка практично не змінилася, а на каналі 11 (40 МГц) навіть дещо зменшилася (-6,25 %), що може бути пов'язано з

варіативністю вимірювань. Середній відсоток втрачених пакетів Ping у всіх цих сценаріях становив 0,00 %, що вказує на збереження базової зв'язності.

За увімкненої технології MU-MIMO базова пропускна здатність TCP (режим “Baseline”) була в діапазоні 10.22 – 11.91 Мбіт/с. Ці значення є зіставні з тими, що були отримані за вимкненого MU-MIMO, що свідчить про відсутність значного впливу MU-MIMO на базову продуктивність в умовах одного активного клієнта.

У табл. 3 наведено результати вимірювань продуктивності мережі Wi-Fi при увімкненій технології MU-MIMO.

Таблиця 3

Середні показники продуктивності Wi-Fi за увімкненої технології MU-MIMO

Канал	Ширина (МГц)	Режим	Середній TCP (Мбіт/с)	Середня затримка (мс)
1	20	Baseline	11,91	3,00
1	20	BT_Active	11,90	3,20
1	40	Baseline	11,64	3,00
1	40	BT_Active	11,61	3,40
6	20	Baseline	11,31	3,20
6	20	BT_Active	10,48	3,80
6	40	Baseline	11,64	2,80
6	40	BT_Active	11,15	3,20
11	20	Baseline	11,60	3,00
11	20	BT_Active	10,22	3,60
11	40	Baseline	11,55	3,00
11	40	BT_Active	11,19	3,20

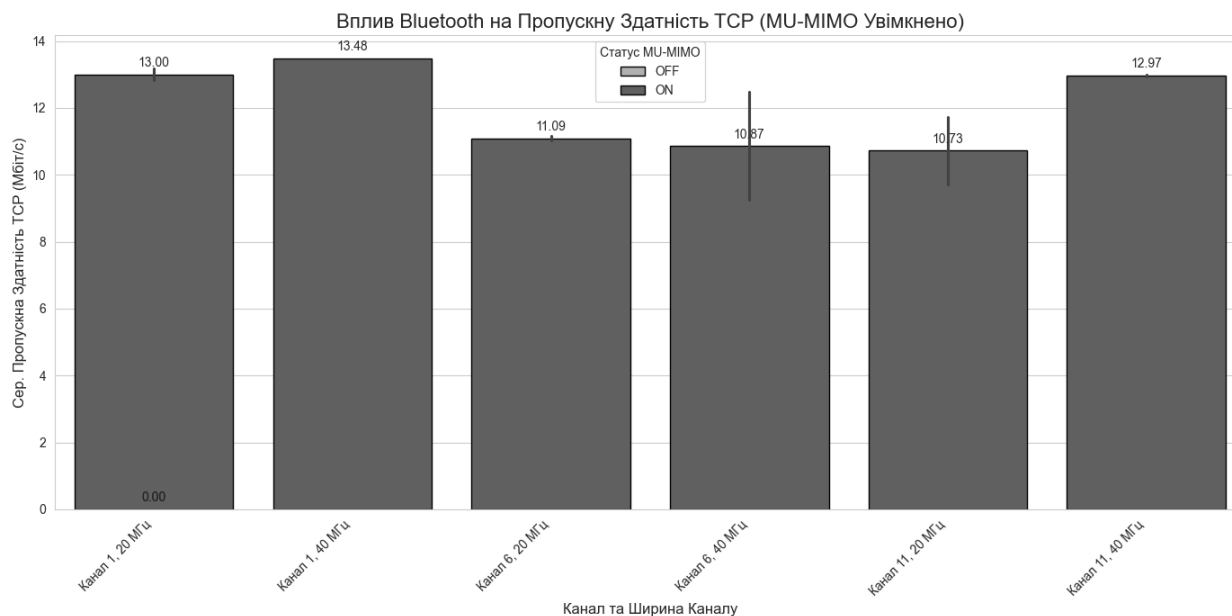


Рис. 2. Вплив Bluetooth на середню пропускну здатність TCP (Мбіт/с) за увімкненого MU-MIMO

Вплив Bluetooth-інтерференції на пропускну здатність TCP (рис. 2) також зберігся. Для каналу 1 зниження було мінімальним (менше 0,3 %). Для каналу 6 падіння становило від -7,34 % (20 МГц) до -4,21 % (40 МГц). Найбільш значне зниження пропускної здатності TCP спостерігалось для каналу 11 (до -11,90 % для 20 МГц). На відміну від сценарію з вимкненим MU-MIMO, під час його активації середня затримка Ping під впливом Bluetooth зростала у всіх тестованих конфігураціях, досягаючи

+20,00 % на каналі 11 (20 МГц), що вказує на послідовне погіршення стабільності відповіді мережі. Середній відсоток втрачених пакетів Ping у всіх сценаріях з увімкненим MU-MIMO також становив 0,00 %.

Для оцінки безпосереднього впливу технології MU-MIMO було проведено порівняння показників продуктивності під час її увімкнення та вимкнення.

Аналіз базової продуктивності (рис. 3) показує, що увімкнення MU-MIMO не призвело до статистично значущого покращення пропускної здатності TCP або середньої затримки Ping у сценарії з одним активним клієнтом. У деяких випадках показники навіть незначно погіршувалися.

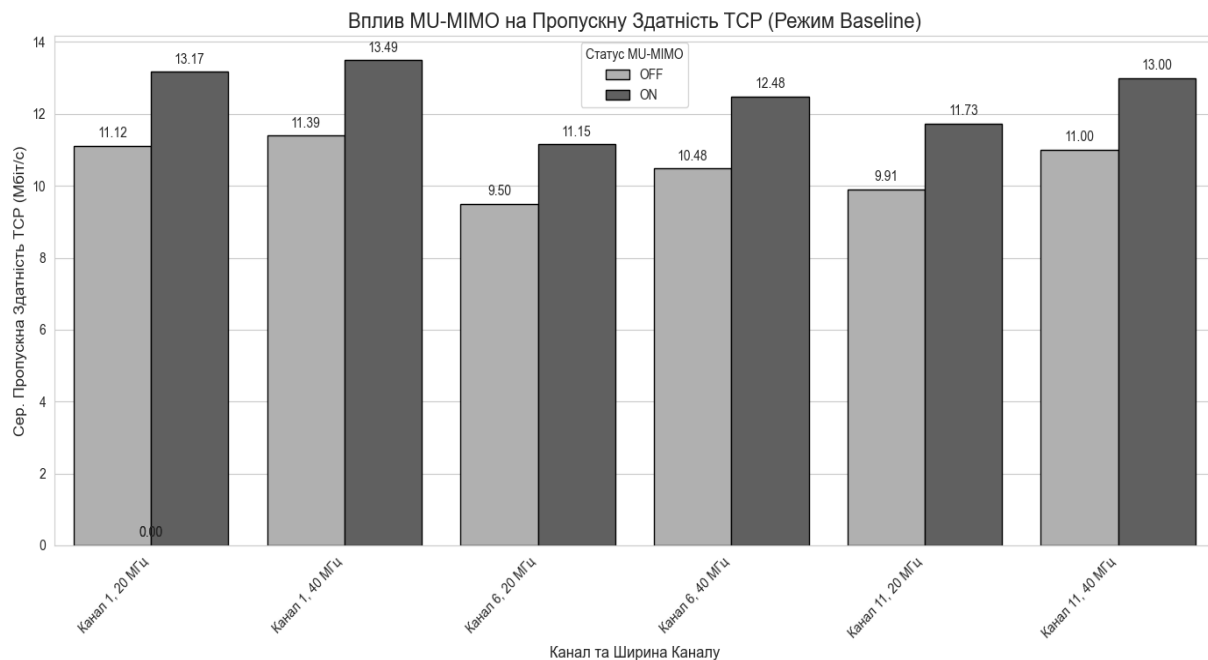


Рис. 3. Порівняння середньої пропускної здатності TCP (Мбіт/с) з MU-MIMO та без MU-MIMO в режимі Baseline

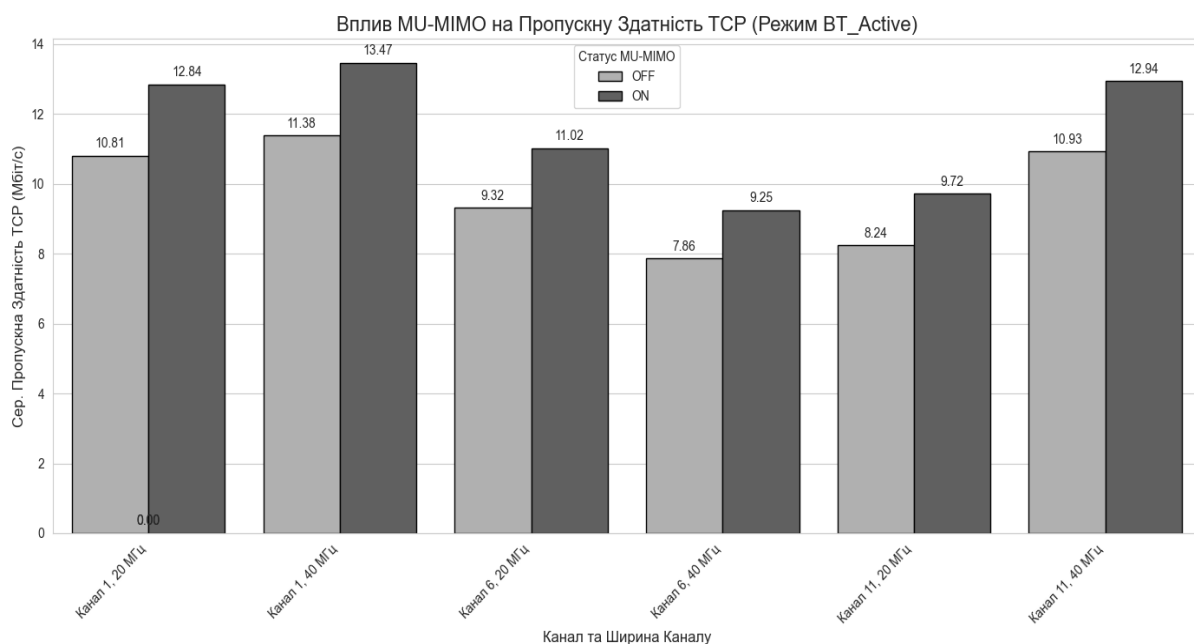


Рис. 4. Порівняння середньої пропускної здатності TCP (Мбіт/с) з MU-MIMO та без MU-MIMO в режимі BT_Active

За наявності Bluetooth-інтерференції (рис. 4) увімкнення MU-MIMO також не продемонструвало чітких переваг. Наприклад, на каналі 6 (20 МГц) падіння TCP було дещо меншим за увімкненого MU-MIMO (-7,34 % проти -10,8 5% без MU-MIMO), однак на каналі 11 (20 МГц) ситуація була протилежною – падіння TCP з MU-MIMO було більшим (-11,90 % проти -9,65 % без MU-MIMO).

Bluetooth-інтерференція від бігової доріжки із застосунком Zwift стабільно призводила до зниження пропускної здатності TCP, особливо на каналах 6 та 11 за ширини 20 МГц. Канал 1 виявився найбільш стійким до падіння швидкості TCP. Цікаво, що використання ширини каналу 40 МГц, хоч і не покращувало базову швидкість, демонструвало менше відсоткове падіння пропускної здатності TCP під впливом Bluetooth порівняно з 20 МГц на всіх каналах, що може свідчити про певний “запас міцності” ширшого каналу.

Технологія MU-MIMO в умовах тестування з одним активним клієнтом не продемонструвала суттєвого позитивного впливу ні на базову продуктивність, ні на стійкість до BLE-інтерференції. Це узгоджується з теорією, що переваги MU-MIMO розкриваються за одночасної роботи кількох сумісних клієнтів.

Важливим позитивним моментом є відсутність втрат пакетів Ping у всіх сценаріях, що вказує на збереження базової зв'язності мережі навіть за умов інтерференції.

Висновки

Проведене експериментальне дослідження впливу інтерференції від Bluetooth Low Energy пристрою (бігова доріжка із застосунком Zwift) та технології MU-MIMO на продуктивність мережі Wi-Fi 5 у діапазоні 2,4 ГГц дало змогу сформулювати такі висновки, що відповідають поставленим меті та завданням.

По-перше, кількісно оцінено, що активна Bluetooth-інтерференція негативно впливає на продуктивність мережі Wi-Fi, призводячи до зниження середньої пропускної здатності TCP в діапазоні від 0,08 % до 11,90 % та здебільшого до збільшення середньої затримки Ping від 0 % до 21,43 %, залежно від конфігурації. Ступінь цього впливу варіюється: канал 1 продемонстрував найбільшу стійкість, тоді як канали 6 та 11 виявилися більш вразливими.

По-друге, встановлено, що використання ширини каналу 40 МГц, хоча й не призвело до покращення базової пропускної здатності (яка залишалася на рівні приблизно 11–12 Мбіт/с), показало тенденцію до меншого відсоткового зниження пропускної здатності TCP під впливом Bluetooth-інтерференції.

По-третє, увімкнення технології MU-MIMO у досліджуваному сценарії з одним активним клієнтом не призвело до суттєвого покращення ні базової пропускної здатності, ні її стійкості до Bluetooth-інтерференції.

По-четверте, низькі базові показники пропускної здатності свідчать про суттєвий вплив умов тестового середовища, зокрема великої відстані до маршрутизатора. Оптимізація фізичного розташування обладнання є ключовим фактором.

Незважаючи на виявлений вплив, важливо виокремити відсутність втрат пакетів Ping, що свідчить про збереження базової зв'язності мережі. Отже, отримано кількісні оцінки впливу BLE-інтерференції, що підтверджує практичну значущість врахування потенційної інтерференції від зростаючої кількості BLE-пристроїв під час планування бездротових мереж. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення впливу більшої кількості BLE-пристроїв та аналіз ефективності MU-MIMO у сценаріях з кількома активними Wi-Fi клієнтами.

Список літератури

1. Polak, L., & Milos, J. (2020). *Performance analysis of LoRa in the 2.4 GHz ISM band: Coexistence issues with Wi-Fi*. *Telecommunication Systems*, 74(3), 299–309. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11235-020-00658-w>.
2. Woolley, M. (2025). *Bluetooth® Core 5.4 – Technical Overview*. Bluetooth SIG. URL: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-5-4-technical-overview/>.
3. Pang, B., Vankeirsbilck, J., Hallez, H., & Boydens, J. (2023). *Experimental validation of common assumptions in Bluetooth Low Energy interference studies*. 2023 IEEE 22nd International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom), 2495–2502. DOI: <https://doi.org/10.1109/TrustCom60117.2023.00350>.
4. Dadwal, J., & Sharma, B. (2016). *Bluetooth SIG oversees development of the specification and prediction of program that protects Bluetooth pin*. *International Journal of Advances in Scientific Research*, 2(2), 59–60. DOI: <https://doi.org/10.7439/ijasr.v2i2.2753>.
5. IEEE. (2022). *IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Corrigendum 1 – Correct IEEE 802.11ay Assignment of Protected Announce Support bit (IEEE Std 802.11-2020/Cor 1-2022)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9999411>.
6. He, S., Zhang, B., Luo, J., & Qu, M. (2021). *Research on coexistence and mutual interference of Wi-Fi and Bluetooth*. 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMMT52847.2021.9617988>.
7. Wagh, S., & Kharote, A. A. P. (2015). *Performance evaluation of IEEE 802.15.4 protocol under coexistence of WiFi 802.11b*. *Procedia Computer Science*, 57, 745–751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.467>.
8. Wang, X., Quek, T. Q. S., Sheng, M., & Li, J. (2017). *On the coexistence of Wi-Fi and LTE-U in unlicensed spectrum*. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7997277>.
9. Khorov, E., Kiryanov, A., Lyakhov, A., & Bianchi, G. (2019). *A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(1), 197–216. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099>.
10. Migliore, M. D. (2014). *Some electromagnetic limitations on the number of users in MU-MIMO communication systems*. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 181–184. DOI: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2300700>.
11. Yan, Y., Yang, P., Xiong, J., & Li, X.-Y. (2022). *OpenCarrier: Breaking the user limit for uplink MU-MIMO transmissions with coordinated APs*. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 18(1), 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1145/3488382>.
12. Pang, B., Claeys, T., T'Jonck, K., Hallez, H., & Boydens, J. (2022). *Bluetooth Low Energy reliability and throughput under Wi-Fi interference*. 2022 XXXI International Scientific Conference Electronics (ET), 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ET55967.2022.9920206>.
13. Kurve, A. (2010). *Multi-user MIMO systems: The future in the making*. *Potentials, IEEE*, 28(5), 37–42. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPOT.2009.934896>.
14. Shepard, C., Ding, J., Guerra, R. E., & Zhong, L. (2016). *Understanding real many-antenna MU-MIMO channels*. 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 461–467. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2016.7869082>.
15. Sports and Fitness Working Group. (2017). *Fitness Machine Service 1.0*. Bluetooth SIG. DOI: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/fitness-machine-service-1-0/>.
16. Silva, P., & Alves, N. (2014). *IPERF tool: Generation and evaluation of TCP and UDP data traffic*. *Notas técnicas*, 4, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.7437/NT2236-7640/2014.02.003>.
17. Zieliński, B. (2023). *Assessment of iPerf as a tool for LAN throughput prediction*. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 69, 523–528. DOI: <https://doi.org/10.24425/ijet.2023.146501>.
18. Horn, B. (2024). *Round-trip time ranging to Wi-Fi access points beats GNSS localization*. *Applied Sciences*, 14(17), 7805. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14177805>.
19. Martínez, G., Hernández, J. A., Reviriego, P., & Reinheimer, P. (2024). *Round trip time (RTT) delay in the internet: Analysis and trends*. *IEEE Network*, 38(2), 280–285. DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.2023.3323008>.

**THE IMPACT OF BLUETOOTH LOW ENERGY INTERFERENCE
AND MU-MIMO TECHNOLOGY
ON WI-FI 5 NETWORK PERFORMANCE**

M. I. Voloshyn, M. V. Oleksiv

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electronic Computing

© Voloshyn M. I., Oleksiv M. V., 2025

The mutual influence of Bluetooth Low Energy (BLE) and Wi-Fi 5 technologies in the 2.4 GHz band was investigated, along with an assessment of MU-MIMO technology effectiveness under such interaction. Experimental measurements of key network performance indicators, such as TCP throughput and connection stability, were conducted for various wireless channel configurations. It was established that BLE activity predominantly negatively affects Wi-Fi parameters. The dependency of interference levels on Wi-Fi channel selection and channel width was analyzed. It was shown that MU-MIMO technology, under single-client testing conditions, did not demonstrate significant improvements in performance or interference resilience. It was found that test environment factors can significantly limit baseline network performance.

Keywords: 2.4 GHz, BLE, Bluetooth Low Energy, channel width, coexistence, FTMS, interference, MU-MIMO, noise immunity, performance, Ping, TCP, Wi-Fi, Zwiift.