



DOI 10.28925/2663-4023.2026.32.1206

УДК 004.94:004.722

Джусь Олексій Петрович

аспірант кафедри систем автоматизованого проектування
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна
ORCID: 0009-0004-0030-6162
oleksii.p.dzhus@lpnu.ua

Лобур Михайло Васильович

доктор технічних наук, професор
завідувач кафедри систем автоматизованого проектування
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна
ORCID: 0000-0001-7516-1093
mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua

МЕТОД АДАПТАЦІЇ ПРОТОКОЛУ BATMAN ДЛЯ BLE L3 MESH МЕРЕЖ

Анотація. У роботі розглянуто проблему адаптації децентралізованого протоколу маршрутизації BATMAN для використання в BLE L3 mesh-мережах, що є актуальним напрямом розвитку безпроводових IoT-систем із обмеженими ресурсами. Проведено аналіз існуючих підходів до організації маршрутизації в BLE Mesh, а також досліджено особливості функціонування BATMAN і його сучасної реалізації BATMAN-adv. Встановлено, що класична модель протоколу, орієнтована на L2-рівень і підтримку двонаправлених з'єднань, не може бути безпосередньо перенесена в BLE-середовище через обмеження технології, зокрема відсутність нативного unicast, малий розмір advertising-пакетів і відсутність підтвердження доставки. Запропоновано підхід до адаптації BATMAN для BLE L3, що базується на використанні контрольованого flooding як механізму передачі даних і службових повідомлень OGM. Розроблено структури пакетів, що інкапсулюються в advertising-повідомлення, а також механізм оцінювання якості маршрутів на основі статистики отриманих OGM. Особливу увагу приділено вибору оптимальних параметрів scanning та advertising, які суттєво впливають на ефективність роботи мережі та рівень втрат пакетів. У роботі також запропоновано гібридну модель маршрутизації, яка поєднує проактивний і реактивний підходи. Виконано комп'ютерне моделювання з використанням Python-скриптів, що дозволило дослідити поведінку мережі при різних конфігураціях параметрів, включаючи кількість вузлів, мобільність і інтенсивність трафіку. Результати показали, що гібридний режим забезпечує більш стабільну затримку передачі даних і значно зменшує обсяг службового трафіку порівняно з чисто проактивними та реактивними протоколами. Зокрема, у збалансованих мережах обсяг службового трафіку зменшується до 1,4 разів відносно проактивного підходу та до 22 разів відносно реактивного. Отримані результати підтверджують можливість ефективної адаптації протоколу BATMAN для BLE mesh-мереж із збереженням його основних переваг – децентралізації, масштабованості та стійкості до змін топології. Запропонований підхід може бути використаний як основа для побудови енергоефективних і надійних IoT-мереж нового покоління.

Ключові слова: BATMAN, BLE mesh, маршрутизація, IoT, flooding, OGM, гібридний протокол, безпроводова мережа.

ВСТУП

Алгоритм Better Approach To Mobile Ad hoc Networking (BATMAN) – це децентралізований протокол маршрутизації, що широко використовуються в безпроводових мережах та розгортаннях MANET [1], та залишається актуальним для сучасних ad hoc мереж, оскільки він спроектований з акцентом на децентралізацію та роботу в умовах нестабільної топології [2], [3]. На відміну від класичних протоколів маршрутизації, таких як OLSR чи AODV, BATMAN не намагається зберігати повну



карту мережі. Кожен вузол оперує лише локальною інформацією, знаючи своїх безпосередніх сусідів і визначаючи найкращий наступний крок для передавання даних до конкретного вузла. Такий підхід зменшує складність обробки маршрутів і робить мережу більш стійкою до збоїв.

Актуальність алгоритму підсилюється наявністю сучасної реалізації BATMAN Advanced (BATMAN-Adv), яка працює на другому рівні моделі OSI. Такий підхід робить маршрутизацію прозорою для IP, IPv6, VLAN та інших мережевих протоколів і значно спрощує інтеграцію з сучасними технологіями, зокрема контейнерами, VPN, IoT і edge-інфраструктурою [2]. При цьому питання безпеки можуть вирішуватися незалежно від самого алгоритму маршрутизації, шляхом використання стандартних механізмів шифрування на каналному або мережевому рівні.

На практиці BATMAN широко застосовується в community-мережах, міських Wi-Fi mesh-інфраструктурах, аварійних і спеціалізованих мережах, а також у середовищах з великою кількістю малопотужних або мобільних пристроїв на другому рівні (L2) OSI моделі. Його ключова ідея – знання лише найкращого наступного вузла замість повної інформації про маршрут – добре відповідає реальним умовам сучасних безпроводових mesh-мереж, де простота, надійність і адаптивність мають вирішальне значення. Але ідеї побудови такого протоколу для енергоефективних сенсорних мереж на третьому рівні (L3) розглянуті не в повному обсязі, тому наступне дослідження покликане закрити цю прогалину.

Постановка проблеми. Об'єктом дослідження є BLE mesh-мережі. Предметом дослідження є програмно-апаратний метод моделювання BATMAN алгоритму на BLE-пристроях. Метою роботи є розробка та експериментальна перевірка якості роботи BATMAN алгоритму у BLE mesh мережі. Існуючі роботи з BATMAN через LoRa та адаптивне затоплення BLE показують, що адаптація BLE L3 повинна зберігати вибір наступного переходу на основі OGM, але інтегрувати контроль затоплення з урахуванням BLE, метрики QoS та агресивне циклічне керування. Поки що не описано жодного повного варіанту BATMAN, специфічного для BLE, тому будь-яка реалізація буде дослідницьким прототипом, керованим цими шаблонами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деякі робіт надають всебічні огляди еволюції та стандартів BLE Mesh. В [4] описується перехід від сенсорних мереж до IoT за допомогою BLE, підкреслюючи його переваги, такі як низьке енергоспоживання та низька вартість. Автори пропонують нову топологію mesh з двома конфігураціями – Individual Mesh (пристрої передають лише власні дані) та Collaborative Mesh (ретрансляція пакетів інших вузлів) – і демонструють покращення масштабованості, покриття та продуктивності (зниження втрат пакетів до 0,11–0,21%) порівняно зі стандартними топологіями BLE та CSR Mesh. В [5] проводиться огляд BLE Mesh, класифікуючи рішення на стандартизовані (Bluetooth SIG, IETF), академічні (flooding- та routing-based) та пропріетарні. В [6] автори аналізують стандарт Bluetooth Mesh, оцінюючи продуктивність за допомогою статистичних, експериментальних та симуляційних методів. Вони показують лінійне зростання затримки з кількістю хопів (наприклад, ~23 мс) та вплив щільності мережі на RTT, але зазначають обмеження для пристроїв з низьким енергоспоживанням. В [7] порівнюються стандарти Bluetooth Mesh та 6BLEMesh (IPv6-oriented), обговорюючи їх функції, енергоспоживання, стійкість та затримки, підкреслюючи роль у IoT.

Значна частина досліджень присвячена удосконаленню протоколів у BLE Mesh, а саме оптимізації flooding та енергозбереженню в BLE Mesh. Автори [8] пропонують алгоритм FADLS (швидкий flooding з адаптивною затримкою та низькоенергетичним



сном), який адаптує максимальну випадкову затримку та час сну реле на основі інформації про сусідів. Симуляції показують зменшення колізій, затримок та адаптивність до змін масштабу мережі. [9] пропонує схему виявлення сусідів та відновлення після збоїв для низькоенергетичних BLE мереж, перевершуючи стандартне flooding за затримкою та споживанням енергії в мульти- та сингл-патх сценаріях. В [10] досліджуються механізми ретрансляції для покращення затримки та надійності, враховуючи топологію, позиції реле та параметри advertising/scanning. В [11] інтегрують BLE Mesh з алгоритмом мурашиної колонії для енергоефективного маршрутизації в WSN, зменшуючи споживання енергії на 35%, подовжуючи термін мережі на 40% та збільшуючи пропускну здатність на 25% порівняно з базовими протоколами.

BATMAN та його варіанти вивчаються в контексті MANET та mesh мереж. В [2] проводиться експериментальну оцінку BATMAN та BATMAN-Adv у мобільному тестовому стенді, показуючи, що BATMAN-Adv L2 забезпечує вищу пропускну здатність у мульти-хоп сценаріях, але з подібними втратами пакетів та джиттером. В [3] оцінюється відновлення end-to-end з'єднань після порушення шляхів у BATMAN mesh, підкреслюючи роль у розширених WiFi мережах для сценаріїв, де потрібна релейна передача. Автори в [12] досліджують оптимізацію маршрутизації mesh мереж з множинними критеріями, фокусуючись на BATMAN-Adv для застосування в рятувальних операціях завдяки портативності та безпеці. А в [1] пропонується модифікація Extended-BATMAN (E-BATMAN) – блокчейн-орієнтований BATMAN з BFT-протоколом для MANET, забезпечуючи розподілену безпеку, такі експерименти показують кращі показники доставки пакетів, затримки, пропускну здатності та енергії порівняно з базовими протоколами.

Огляд показує, що BLE Mesh еволюціонує до енергоефективних, надійних мереж з фокусом на flooding-оптимізацію та безпеку, тоді як BATMAN підходить для мобільних сценаріїв з інтеграціями, як блокчейн. Відкриті питання включають інтероперабельність стандартів, IDS для BLE, вплив мобільності на BATMAN та масштабованість для великих IoT-розгортань. Ці дослідження формують основу для подальших інновацій у безпроводних mesh мережах.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Важливою перевагою BATMAN є його здатність швидко адаптуватися до змін. У сучасних mesh-мережах вузли можуть бути мобільними, а якість радіоканалів – змінюватися в реальному часі. Завдяки постійному обміну службовими повідомленнями OGM, вузли регулярно оновлюють інформацію про доступність і якість маршрутів, що дозволяє оперативно перебудовувати шляхи передавання даних без глобальної перебудови всієї мережі. Алгоритм також добре масштабується, оскільки не потребує зберігання або поширення повної топології. Обсяг службового трафіку залишається відносно малим навіть у великих мережах, що дає змогу ефективно працювати з сотнями й тисячами вузлів. Це робить BATMAN придатним для великих розподілених систем, де класичні протоколи можуть створювати надмірне навантаження.

Для реалізації алгоритму в статті пропонується модифікувати та застосувати BATMAN до BLE мереж із максимальним повторенням його специфікації.



РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Засади для адаптації BATMAN L2 для застосування на L3. BATMAN виявляє двонаправлені з'єднання та найкращий наступний стрибок, використовуючи періодично заповнені повідомлення ініціатора 'Originator Group Message' (OGM), а також порядкові номери та статистику для кожного сусіда [13]. У низькошвидкісних LoRa-мережах BATMAN вже адаптований з:

- синхронізацією часу;
- розділеним ALOHA MAC;
- метриками маршрутизації з урахуванням QoS. Це показує, що логіка протоколу може знаходитися над обмеженим радіо, якщо зберігаються затоплення та оцінка якості сусідів [13], [14].

BATMAN ґрунтується на принципі локального прийняття рішень. Кожен вузол не зберігає повну топологію мережі, не обчислює глобальні маршрути, визначає лише найкращий наступний перехід. Таким чином, маршрути формуються поступово, а рішення приймаються на основі статистики реального радіозв'язку. Ключовим механізмом є OGM-пакети, які періодично генеруються кожним вузлом, розповсюджуються мережею, містять порядковий номер та TTL і дозволяють оцінити стабільність шляхів. На основі прийнятих OGM кожен вузол формує таблицю взаємодії, де для кожного вузла-джерела обирається найкращий сусід, через якого найчастіше та стабільніше приходять OGM.

Вузли не підтримують глобальну топологію, лише найкращий наступний стрибок до кожного пункту призначення, використовуючи ковзне вікно для отриманих повідомлень відправника (OGM) для оцінки якості шляху [15]. OGM періодично перевантажуються; правила синхронізації та повторної трансляції є критично важливими для виявлення двонаправленого з'єднання, свободи від петель та оптимальності маршруту [16], [17]. BATMAN-adv працює на L2, вбудовуючи маршрутизацію в пакети даних та спрощуючи конфігурацію IP-рівня [18]. Формальне моделювання виявляє неоднозначності в RFC; альтернативна модель зменшує субоптимальні маршрути, зберігаючи при цьому властивості коректності. Нещодавня робота досліджує BATMAN з використанням федеративного навчання для прогнозування змін топології та зменшення перевантаження в роях безпілотників, вирішуючи проблеми накладних витрат та затримок у великих, швидкозмінних мережах [15].

У сценаріях асиметричного з'єднання новіші версії BATMAN покращують коефіцієнт доставки та ефективність переходів, контролюючи при цьому накладні витрати [18]. Зовнішні mesh-платформи та вбудовані тестові стенди (наприклад, плати ALIX, Raspberry Pi) демонструють практичну доцільність, а продуктивність оцінюється за затримкою, пропускну здатністю та коефіцієнтом доставки пакетів [19].

Обмеження Bluetooth Low Energy для реалізації BATMAN. Bluetooth Low Energy у режимі legacy advertising має максимальний розмір advertising-payload – 31 байт, включно з AD-структурами, а advertising є однонаправленим broadcast-механізмом, що визначається відсутністю підтвердження доставки, відсутністю контролю колізій та відсутністю справжнього unicast. Всі приймачі отримують однаковий пакет без можливості адресного вибору отримувача. Ці особливості роблять неможливим пряме перенесення класичного BATMAN-adv у BLE.

В офіційних матеріалах Nordic Semiconductor зазначено, що одночасна робота advertising та scanning є дозволеною, за умови коректного вибору параметрів [20].



Зазначається, що програмне забезпечення має пріоритетний доступ до радіо і проблеми виникають не через апаратні переривання, а через конфігурацію інтервалів.

Архітектура адаптивного апаратного рішення. Реалізація базується на таких обмеженнях:

- використання BLE advertising як транспортного рівня;
- інкапсуляція власних пакетів у Manufacturer Specific Data;
- відмова від справжнього unicast на користь контрольованого flooding;
- адаптація алгоритмів BATMAN-adv до broadcast-моделі.

Тому загальний вид пакету (див. Лістинг 1) не повністю задовільняє обмеженням.

```
typedef struct __attribute__((packed)) {
    uint8_t magic; // ідентифікатор протоколу, що дозволяє відфільтрувати
                  // сторонні advertising-пакети
    uint8_t type; // тип пакету (OGM або DATA)
} pkt_hdr_t;
```

Лістинг 1. Формат загального пакету

Реальний фізичний відправник sender визначається через peer_addr з advertising report, що показано на Лістингу 2.

```
typedef struct __attribute__((packed)) {
    pkt_hdr_t hdr;
    uint8_t ttl;
    uint16_t seqno;
    uint8_t originator[6]; // вузол, який ініціював OGM
    uint8_t sender[6]; // логічний відправник (змінюється при
retрансляції)
} ogm_packet_t;
```

Лістинг 2. Формат загального OGM-пакету

З іншого боку, для OGM-пакету (див. Лістинг 3) відсутній next_hop, оскільки BLE advertising не підтримує unicast, а доставка реалізується через flooding + TTL і дублікати відсікаються через (src і seqno).

```
typedef struct __attribute__((packed)) {
    pkt_hdr_t hdr;
    uint8_t ttl;
    uint16_t seqno;
    uint8_t src[6];
    uint8_t dest[6];
    uint8_t pdu_len;
    uint8_t pdu[MAX_PDU_LEN];
} data_packet_t;
```

Лістинг 3. Формат загального OGM-пакету

Формується виключно на основі MAC-адреси з advertising report, а не з payload пакету. Це принципово важливо, оскільки payload може містити логічний sender, а фізичний сусід визначається лише рівнем BLE. Для кожного originator зберігається список кандидатів next hop, score кожного кандидата і обраний best next hop. Score змінюється на основі частоти прийому OGM через конкретного сусіда, що відповідає ідеології BATMAN-adv.

OGM ретранслюється, якщо TTL > 1 і пакет отримано через best next hop. Це обмежує лавиноподібну генерацію пакетів (flooding). Але DATA-пакети передаються за



принципом контрольованого flooding: кожен вузол може ретранслювати пакет, TTL зменшується, дублікати відкидаються і при досягненні dest пакет доставляється локально. Таким чином досягається баланс між відмовостійкістю, ефірним навантаженням і простотою реалізації.

Під час експериментів було виявлено, що при великих scanning window відбувається втрата advertising-пакетів, без виклику Bluefruit.Scanner.resume() сканування зупиняється і надмірна частота advertising зменшує час прийому, тому були обрані параметри

```
#define SCAN_INTERVAL 0x0020  
#define SCAN_WINDOW 0x0020  
#define ADV_INTERVAL 160
```

які забезпечують регулярне вікно прийому, достатній ефірний час для advertising і мінімізацію колізій.

Ретрансляція не завжди проявлялася, оскільки пакети доставлялися напряму, дублікати відсіювалися і ретрансляція проявлялася лише у зменшенні TTL. Факт ретрансляції підтверджувався появою $TTL = N - 1$ на стороні приймача.

Також була зафіксована помилка DATA drop: truncated payload, яка проявляється через часткову втрату advertising-пакету, невідповідність pdu_len та фактичного payload або ефірні колізії. Для її усунення можна скорочувати payload, повторно передавати з jitter або зменшувати «агресивність» параметрів. Також у реалізації було свідомо знехтувано справжнім unicast, АСК-механізмами, extended advertising і фрагментацією, що обґрунтовано обмеженнями BLE.

У мікроконтролерах серії nRF52, зокрема nRF52840, керування радіопідсистемою повністю здійснюється через SoftDevice – закритий бінарний стек BLE, який має ексклюзивний доступ до радіомодуля 2.4 ГГц, високопріоритетних апаратних переривань і таймерів, необхідних для точного дотримання BLE-таймінгів. Застосунковий код (application layer) не взаємодіє з радіо безпосередньо, а лише формує запити до SoftDevice через API (sd_ble_*). Це означає, що одночасна робота advertising та scanning не є паралельною в апаратному сенсі, а реалізується шляхом детермінованого планування радіо-вікон самим SoftDevice. Відповідно до пояснень Nordic Semiconductor, використання інших периферійних модулів (таймери, SAADC, GPIO переривання) не впливає на роботу BLE, оскільки SoftDevice працює на вищому пріоритеті переривань і використовує зарезервовані апаратні ресурси.

BLE використовує часово-орієнтовану модель доступу до радіо, де всі операції (advertising, scanning, connection події) описуються як короткі радіо-вікна з жорстко визначеною тривалістю. SoftDevice виконує такі дії: формує чергу радіо-завдань (radio tasks), призначає кожному завданню момент початку, тривалість, пріоритет, а у разі конфлікту пріоритет надається послідовно connection, advertising і scanning подіям. Таким чином, сканування може бути тимчасово перерваний advertising-подією, що безпосередньо впливає на кількість прийнятих advertising-пакетів.

В офіційних відповідях Nordic Semiconductor однозначно зазначено, що одночасна робота advertising та scanning дозволена і підтримується. Це підтверджується наявністю BLE Relay Example у nRF5 SDK v16.0.0, де один і той самий пристрій одночасно виконує scanning як central і advertising як peripheral. У BLE Relay Example один пристрій виступає проміжним вузлом (relay), який з одного боку сканує та підключається до сенсорів, а з іншого рекламує себе для collector'a. Цей приклад демонструє, що SoftDevice коректно мультиплексує радіо-час між режимами, за умови



адекватної конфігурації таймінгів.

У практичних експериментах, описаних у DevZone, спостерігалася значна втрата пакетів при таких параметрах $advertising_interval \approx 90$ мс, $scanning_interval \approx 105$ мс і $scanning_window \approx 100$ мс. Основна причина полягає у майже повному перекритті $scanning_window$, що призводить до частих пріоритетних переривань $scanning$ -процесу $advertising$ -подіями, втрати частини $advertising$ -пакетів іншого вузла і нерівномірного розподілу ефірного часу. Таким чином, проблема не є апаратною і не пов'язана з периферією, а має суто часову природу.

$Advertising_interval$ визначає верхню межу кількості пакетів, тому кількість $advertising$ -пакетів, які можуть бути прийняті за секунду, апроксимується формулою:

$$N \approx 1 / advertising_interval$$

Тому 90 мс (≈ 11 пакетів/с), що і було підтверджено у DevZone, і вимога 13–14 пакетів/с фізично несумісна з таким інтервалом. Отже, неможливо отримати більше пакетів, ніж їх було передано.

Рекомендований підхід полягає у зменшенні $scanning_window$ і $scanning_interval$, а також використанні коротких, але частих $scanning$ -вікон. Наприклад, $scanning_window = 20$ мс і $scanning_interval = 20$ мс. Такий підхід зменшує час, коли $scanning$ блокує $advertising$, дозволяє SoftDevice більш гнучко вставляти $advertising$ -події між $scanning$ -вікнами і збільшує сумарний ефірний час прийому.

Важливо враховувати, що BLE $advertising_interval$ не є строго детермінованим. До кожного $advertising$ -поділу додається псевдовипадковий зсув, що зменшує ймовірність постійних колізій і ускладнює точне прогнозування моментів передачі. Це ще один аргумент на користь коротких $scanning$ -вікон, а не одного довгого.

Одночасна робота $advertising$ та $scanning$ у nRF52840 підтримується SoftDevice і не є проблемою з точки зору архітектури. Використання таймерів, SAADC, GPIO interrupt не впливає на BLE, оскільки SoftDevice має вищий пріоритет. Основним фактором втрати пакетів є некоректний вибір таймінгів, а не апаратні обмеження. $Advertising_interval$ задає фізичну межу кількості переданих пакетів. Оптимізація досягається не збільшенням $scanning_window$, а зменшенням та частішим повторенням $scanning$ -вікон. BLE Relay Example з nRF5 SDK є підтвердженням працездатності concurrent-моделі, але використовує її у connection-орієнтованому сценарії, а не у broadcast mesh. Ці положення безпосередньо лягли в основу реалізації mesh-подібного протоколу на основі BLE $advertising$, описаного у попередніх розділах.

Порівняння із реалізаціями проактивних та реактивних протоколів. Гібридний режим існує тоді, коли мережа одночасно використовує обидва механізми маршрутизації – проактивний (OGM у зоні k -хопів) і реактивний (RREQ/RREP поза зоною).

Частка проактивних пакетів визначається як

$$p = \frac{N_{pro}}{N_{pro} + N_{rea}} 100\%, p \in [0, 100], \quad (1)$$

де N_{pro} і N_{rea} – кількість доставлених проактивних і реактивних пакетів

Класифікація режиму:



$$\text{режим} = \begin{cases} \text{реактивний, } p \leq 10, \\ \text{слабкий гібридний, } 10 < p < 20, \\ \text{сильний гібридний, } 20 \leq p \leq 80, \\ \text{слабкий гібридний, } 80 < p < 90, \\ \text{проактивний, } p \geq 90. \end{cases} \quad (2)$$

Гібридний режим має місце, якщо одночасно виконуються дві нерівності для джерела (*src*) та призначення (*dst*):

$$\begin{aligned} \exists \text{ пари}(src, dst) \text{ з відстанню } \leq k \text{ і якістю шляху } \geq \theta \text{ (проактивні),} \\ \exists \text{ пари}(src, dst) \text{ з відстанню } > k \text{ і якістю шляху } < \theta \text{ (реактивні),} \end{aligned} \quad (3)$$

тобто для сильного гібриду

$$0,2 \leq \frac{N_{\text{pro}}}{N_{\text{pro}} + N_{\text{rea}}} \leq 0,8. \quad (4)$$

Вплив ключових параметрів на p (аналітичні тенденції):

- $p \uparrow$ при збільшенні k або зменшенні θ – більше пар потрапляє в проактивну зону;
- $p \downarrow$ при збільшенні кількості вузлів, мобільності або крок глобального оновлення T_{glob} – кеш частіше застаріває \rightarrow більше реактивних запитів.

Для порівняння із іншими типами протоколів був додатково написаний інший Python-скрипт, який проводить перевірку із великою кількістю параметрів та шукає лише ті режими, які дозволяють гібридному проколу одночасно працювати із активними та реактивними пакетами.

Ця формула повністю визначає гібридність мережі і використовується в методі `classify()` для автоматичного розпізнавання режиму після симуляції (див. Лістинг 4).

```
def classify(pct: float) -> str:
    if HYBRID_STRONG_LO < pct < HYBRID_STRONG_HI:
        return "сильний"
    if HYBRID_WEAK_LO < pct < HYBRID_WEAK_HI:
        return "слабкий"
    if pct <= HYBRID_WEAK_LO:
        return "реактивний"
    return "проактивний"
```

Лістинг 4. Метод для визначення режиму роботи

Результати комп'ютерного моделювання. Для симуляції роботи гібридного протоколу був написаний Python-скрипт, який дозволяє проводити експерименти із різними режимами роботи. Всі параметри задаються або в конфігурації за замовчуванням, або в вигляді параметрів запуску скрипта.

Розглянемо роботу мережі в представлених режимах роботи. Результати роботи скрипта для сильного і слабого гібридних режимів проводилися для фіксованих значень $\lambda = 0,7$, $\alpha = 0,5$, $\beta = 0,3$, $\gamma = 0,2$, 60 кроків і 8 пакетів за крок. Змінюються параметри: глибина проактивної зони k , поріг прийнятного маршруту θ , ймовірність руху вузла за крок і крок глобального оновлення T_{glob} , що реалізується в 405 комбінаціях (табл. 1). Для симуляції вибрана невелика мережа із 20 вузлів із площею 500 м і радіусом радіоканалу 150 м.

Таблиця 1

Результати симуляції із різними режимами роботи

Режим роботи	Кількість комбінацій	Частка від результатів, %
Реактивний	135	33,3
Слабкий гібридний	27	6,7
Сильний гібридний	54	13,3
Проактивний	189	46,7
Всього	405	

Мережа входила в сильний та слабкий гібридний режими у одній п'ятій всіх симуляцій, що вказує, що такий режим не завжди є оптимальним. В табл. 2 і 3 приведені приклади параметрів моделі, при яких мережа переходить в гібридний режим.

Таблиця 2
**Результати симуляції для сильного гібридного режиму роботи
(перші 12 результатів)**

Поріг прийняттого маршруту	К-сть вузлів	Ймовірність руху вузла за крок	Крок глобального оновлення	Частка проактивних пакетів, %	PDR, %	Затримка, мс	Службовий трафік, КБ
0,05	40	0,6	[3, 5, 10]	64,8	18,96	35,54	1294
0,05	40	0,4	[3, 5, 10]	65,6	20,00	35,27	1312
0,10	40	0,6	[3, 5, 10]	68,4	16,46	36,37	1334
0,05	30	0,4	[3, 5, 10]	71,2	15,21	34,73	857

Таблиця 3
**Результати симуляції для слабого гібридного режиму роботи
(перші 12 результатів)**

Поріг прийняттого маршруту	К-сть вузлів	Ймовірність руху вузла за крок	Крок глобального оновлення	Частка проактивних пакетів, %	PDR, %	Затримка, мс	Службо-вий трафік, КБ
0,20	40	0,2	[3, 5, 10]	80,6	15,00	30,85	1355
0,10	30	0,2	[3, 5, 10]	82,5	16,67	30,78	861
0,05	30	0,6	[3, 5, 10]	82,7	16,88	29,73	826
0,15	40	0,2	[3, 5, 10]	83,1	16,04	31,28	1349

В експериментах мережа генерувалася із схожою конфігурацією для зручності порівняння (див. топологію на рис. 1). В даному прикладі сформовані кілька груп вузлів, що відповідає реальним нерівномірним мережам. Кольорами позначена завантаженість вузлів. Передача проводилась в довільному порядку між різними вузлами.

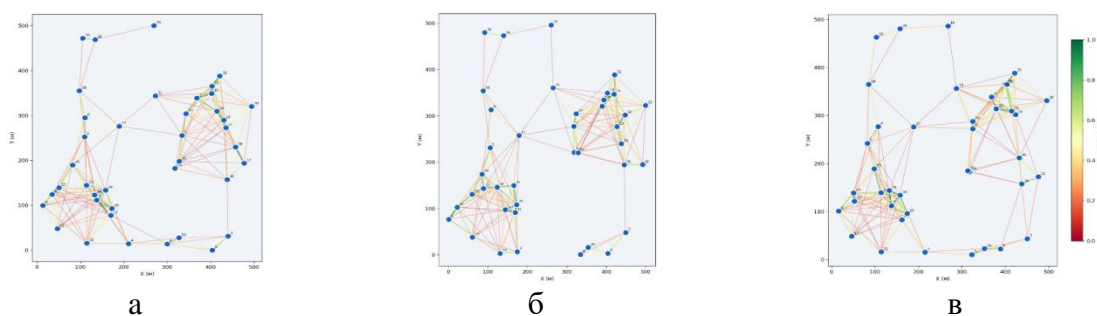


Рис. 1. Топологія симуляції збалансованої мережі для проактивного (а), сильного гібридного (б) і реактивного (в) режимів

Одним із найбільш показових параметрів моделювання є затримка доставки пакета, що показано на рис. 2. В усіх проактивному (рис. 2а) та реактивному (рис. 2в) режимах видно, що затримка може сягати 60 мс, але для гібридного режиму (рис. 2б) ця затримка розподілена більш рівномірно по всіх кроках.

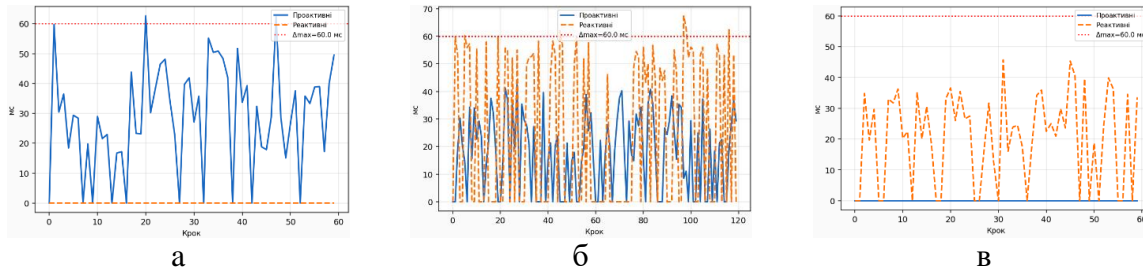


Рис. 2 Середньої затримки доставки у збалансованій мережі для проактивного (а), сильного гібридного (б) і реактивного (в) режимах

Додатковим параметром, який впливає на пропускну здатність системи є об'єм службового трафіку, який для запропонованого гібридного протоколу в 1,4 рази менший для проактивного протоколу і в 22,0 разів менший для реактивного (див. рис. 3а) для мережі, яка працює в збалансованому режимі. Також видно із рис. 3б, що службовий трафік в проактивному режимі є приблизно в два рази більшим за реактивний службовий трафік.

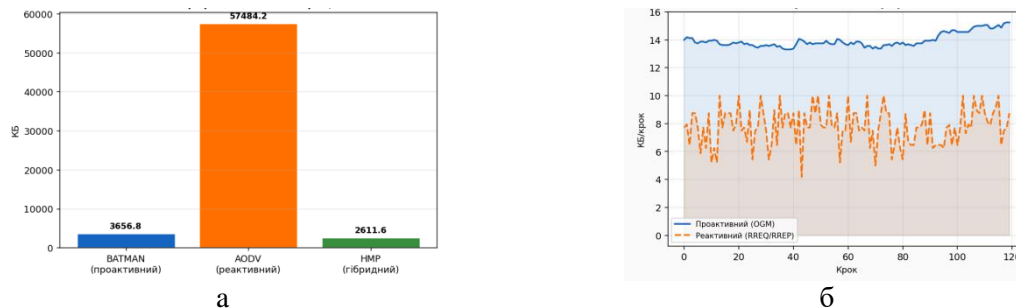


Рис. 3. Порівняння об'єму службового трафіку у збалансованій мережі: порівняння різних протоколів (а) і відношення службового трафіку для гібридного протоколу (б)

При високій завантаженості мережі гібридний варіант дозволяє лишатися мережі більш стабільною. Для перевірки був вибраний режим більш рівномірно розташованих вузлів (така мережа теж має локальні купності, але вони теж рівномірно рознесені по площині). На рис. 4 представлений приклад мережі із 400 вузлів з пропускну здатністю на рівні третини відправлених пакетів, що для пакетної передачі без підтвердження є нормальним робочим режимом.

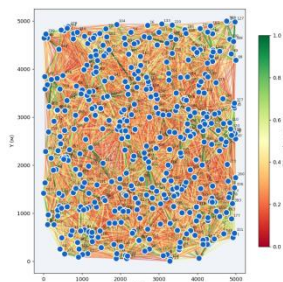


Рис. 4. Приклад завантаженої мережі

Навіть роботі завантаженої мережі гібридний протокол показує на 2% кращу затримку передачі окремого пакету (див. рис. 5).

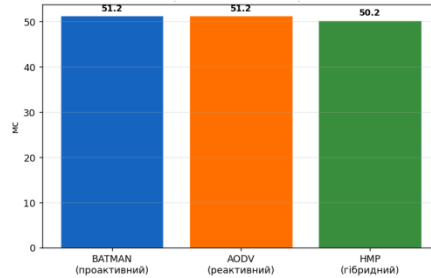
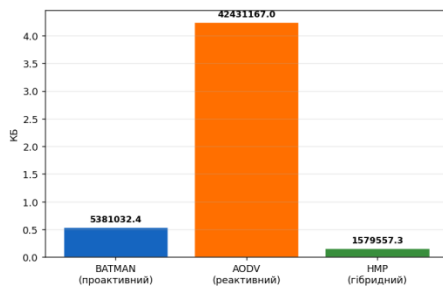
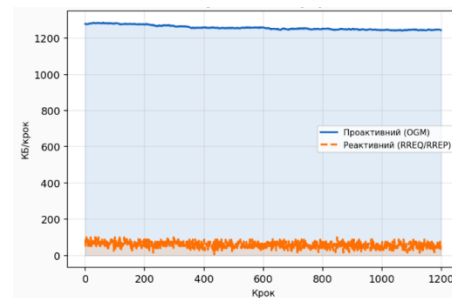


Рис. 5. Затримка при доставці пакету у завантаженій мережі

Об'єм службового трафіку для запропонованого гібридного протоколу в 3,4 рази менший для проактивного протоколу і в 26,9 разів менший для реактивного (див. рис. 6а) для завантаженої мережі. Для даного режиму проактивний трафік значно перевищує реактивний (рис. 6б).



а



б

Рис. 6. Порівняння об'єму службового трафіку у завантаженій мережі: порівняння різних протоколів (а) і відношення службового трафіку для гібридного протоколу (б)

Одним із крайових режимів роботи є режим неповної зв'язаності меш мережі, яка може розпадатися на велику кількість підмереж, які іноді можуть контактувати із сусідами. Приклад такої мережі показаний на рис. 7, у якій частка проактивних пакетів складає 66,7%.

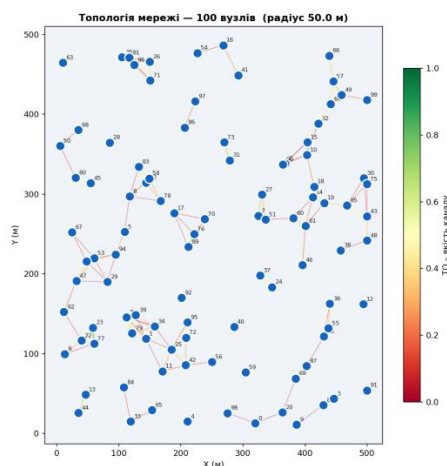


Рис. 7. Приклад слабо зв'язаної мережі

Але навіть в такій топології гібридний режим дозволяє частково працювати із сусідніми вузлами. Хоча кількість доставлених пакетів (рис. 8а) незначна і затримка доставки має великі паузи у передачі (рис. 8б), але мережа все одно продовжує працювати в гібридному режимі.

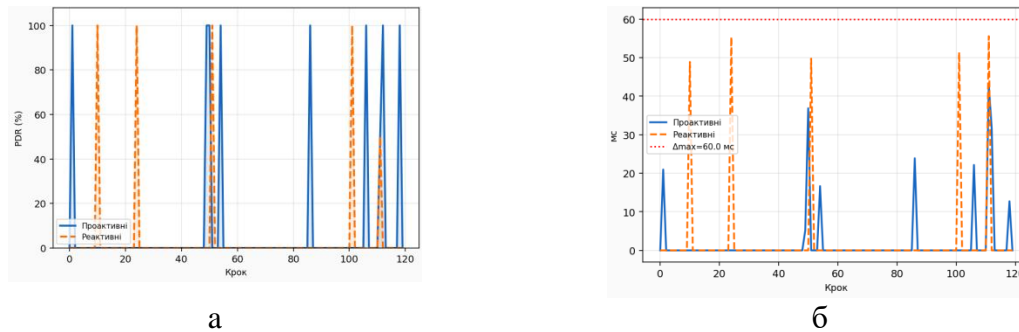


Рис. 8. Частка доставлених пакетів (а) і середня затримка пакетів (б) у слабко зв'язаній мережі

Також симуляція проводилася із залученням параметрів втрат через завади та внутрішню каналну інтерференцію, але їх застосування хоча і наближає симуляцію до реальному мережі, але якісно не впливає на співвідношення пакетів в різних режимах роботи.

ОБГОВОРЕННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ

Щоб орієнтуватися на L3-мережу BLE потокове розповсюдження 'flooding' та низькопотужних мереж вносять такі зміни:

1. Керування потоковим розповсюдженням та синхронізація, бо BLE-мережа вже використовує кероване затоплення, а колізії та «широкомовні шторми» є основними проблемами. Шар BATMAN OGM міг би повторно використовувати перевантаження BLE, але додав адаптивні випадкові затримки та планування сну, подібно до FADLS, який регулює затримку та сплячий режим ретрансляції на основі інформації про легких сусідів, щоб зменшити колізії та затримку [8].

2. Проектування QoS та метрик для низькошвидкісних радіостанцій метрики маршрутизації були розширені умовами QoS, що враховують трафік, для покращення доставки порівняно зі звичайними метриками призначення BATMAN [14] і для BLE метрики можуть включати: робочий цикл ретрансляції, частоту колізій (зі статистики сусідів, подібною до FADLS) та надійність з'єднання для вибору наступних стрибків.

3. Витрати на керування впливають на сталу роботу мережі, тому алгоритми мають бути уповільнені та циклічні, щоб відповідати енергетичним обмеженням BLE, і, можливо, використовуватись на існуючих повідомленнях керування мережею BLE, керуючись формальним розумінням поведінки BATMAN під час затоплення [13].

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В роботі розроблено та експериментально досліджено програмно-апаратний метод моделювання BLE-пакетів, який дозволяє створювати налаштовувальні джерела реклами на базі nRF52840, Python-оркестратор для керованого запуску передавачів та два незалежні приймачі: Android-застосунок із зовнішньою BLE-антенною й апаратний



сніффер SmartRF. Запропонована схема збору й обробки даних дає змогу кількісно оцінювати розподіл помилок і втрат у різних режимах роботи рекламного каналу. Показано, що при оптимальних комбінаціях параметрів більшість кадрів приймаються обома приймачами, тоді як збільшення інтервалу реклами й довжини payload у реальному зашумленому ефірі призводить до різкого погіршення прийому на Android-пристрої. Експерименти з генератором завад підтвердили, що за наявності потужного широкосмугового шуму рекламний канал практично повністю заблокований.

У роботі вирішено науково-практичну задачу адаптації протоколу BATMAN для використання в BLE L3 mesh-мережах із урахуванням обмежень технології Bluetooth Low Energy. Запропоновано архітектуру протоколу, що базується на контрольованому flooding та використанні OGM-повідомлень для оцінки якості маршрутів. Розроблено формат пакетів і механізми вибору наступного вузла, які забезпечують роботу в умовах відсутності класичного unicast-зв'язку.

Результати моделювання підтвердили ефективність гібридного підходу до маршрутизації, який дозволяє досягти балансу між затримкою передачі, обсягом службового трафіку та надійністю доставки пакетів. Встановлено, що правильний вибір параметрів scanning та advertising є критично важливим для забезпечення стабільної роботи мережі. Таким чином, запропонований підхід відкриває перспективи для створення нових енергоефективних, масштабованих і надійних mesh-мереж на базі BLE, що відповідають вимогам сучасних IoT-систем.

Подальші дослідження доцільно спрямувати у кількох напрямках. По-перше, на вдосконалення Android-застосунку та прошивки антени nRF52840 (оптимізація обробки потоку пакетів, FIFO-черги для передачі з антени до смартфона) з метою зменшення втрат у вузьких місцях. По-друге, на розширення набору сценаріїв: дослідження не лише рекламних, а й з'єднаних режимів BLE, інших шаблонів корисного навантаження, різних типів завад (вузькосмугові, спрямовані на окремі канали тощо). По-третє, на використання створеного стенду як інструмента для оцінки завадостійкості та інформаційної безпеки BLE-рішень у прикладних задачах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Singh, U., Sharma, S. K., Shukla, M., & Jha, P. (2024). Blockchain-based BATMAN protocol using mobile ad hoc network (MANET) with an ensemble algorithm. *International Journal of Information Security*, 23(3), 1667–1677. <https://doi.org/10.1007/s10207-023-00804-w>
2. Kiran, K., Kaushik, N. P., Sharath, S., Shenoy, P. D., Venugopal, K. R., & Prabhu, V. T. (2018). Experimental evaluation of BATMAN and BATMAN-Adv routing protocols in a mobile testbed. In *2018 IEEE Region 10 Conference (TENCON)* (pp. 1538–1543). <https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650222>
3. Yilmaz, I., Jagadeesan, A. P., Zhang, J., Rischke, J., Nguyen, G. T., & Fitzek, F. H. P. (2025). Evaluation of end-to-end connection recovery after traffic path disruption in BATMAN mesh networks. In *2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/WCNC61545.2025.10978701>
4. Hortelano, D., Olivares, T., Ruiz, M., Garrido-Hidalgo, C., & López, V. (2017). From sensor networks to Internet of Things: Bluetooth Low Energy as a standard for this evolution. *Sensors*, 17(2), 372. <https://doi.org/10.3390/s17020372>
5. Darroudi, S., & Gomez, C. (2017). Bluetooth Low Energy mesh networks: A survey. *Sensors*, 17(7), 1467. <https://doi.org/10.3390/s17071467>
6. Baert, M., Rossey, J., Shahid, A., & Hoebeke, J. (2018). The Bluetooth mesh standard: An overview and experimental evaluation. *Sensors*, 18(8), 2409. <https://doi.org/10.3390/s18082409>
7. Darroudi, S. M., Gomez, C., & Crowcroft, J. (2020). Bluetooth Low Energy mesh networks: A standards perspective. *IEEE Communications Magazine*, 58(4), 95–101. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900523>



8. Wang, L., Li, J., & Li, M. (2024). A rapid flooding approach based on adaptive delay and low-power sleep for BLE mesh networks. *IEEE Access*, 12, 65323–65332. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3398348>
9. Villa, D., Lin, C.-K., Kuenzi, A., & Lang, M. (2022). Bluetooth Low Energy mesh network for power-limited, robust and reliable IoT services. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.04050>
10. Belli, A., Esposito, M., Raggiunto, S., Palma, L., & Pierleoni, P. (2025). Relaying mechanisms in BLE mesh networks: A method for improving latency and reliability. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(12), 22282–22297. <https://doi.org/10.1109/IJOT.2025.3550831>
11. Mohammed, H. S., Mustafa, H. K., & Abdulkareem, O. A. (2025). Enhancing wireless sensor networks with Bluetooth Low Energy mesh and ant colony optimization algorithm. *Algorithms*, 18(9), 571. <https://doi.org/10.3390/a18090571>
12. Lin, J., Liu, Z., & Dai, J. (2019). Research and optimization of wireless mesh network routing protocol with multiple criteria. In *2019 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)* (pp. 72–78). <https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997932>
13. Fehnker, A., Chaudhary, K., & Mehta, V. (2018). Improving the B.A.T.M.A.N. protocol through formal modelling and analysis. In A. Dutle et al. (Eds.), *NASA formal methods* (pp. 164–178). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77935-5_12
14. Chache, F. M., Maxon, S., Narayanan, R. M., & Bharadwaj, R. (2021). QoS extension to a B.A.T.M.A.N.-based LoRa mesh network. In *2021 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)* (pp. 43–48). <https://doi.org/10.1109/MILCOM52596.2021.9653022>
15. M, D. (2019). Performance evaluation of routing algorithm for MANET based on machine learning techniques. *Journal of Trends in Computer Science and Smart Technology*, 1(1), 25–38. <https://doi.org/10.36548/jtcsst.2019.1.003>
16. Sliwa, B., Falten, S., & Wietfeld, C. (2019). Performance evaluation and optimization of B.A.T.M.A.N. V routing for aerial and ground-based mobile ad hoc networks. In *2019 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)* (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2019.8746361>
17. Klein, A., Braun, L., & Oehlmann, F. (2012). Performance study of the B.A.T.M.A.N. protocol in the context of asymmetric links. In *2012 IEEE WoWMoM* (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2012.6263783>
18. Anas, N. M., Hashim, F. K., Mohamad, H., Baharudin, M. H., & Sulong, M. P. (2015). Performance analysis of outdoor wireless mesh network using B.A.T.M.A.N. advanced. In *2015 IEEE SNPD* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/SNPD.2015.7176189>
19. Nordic Semiconductor. (n.d.). *Is it possible to scan and advertise at the same time?* <https://devzone.nordicsemi.com/f/nordic-q-a/75305/is-it-possible-to-scan-and-advertise-at-the-same-time>

**Oleksii Dzhus**

Ph.D. student of the Computer Aided Design Department
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: 0009-0004-0030-6162
oleksii.p.dzhus@lpnu.ua

Mykhaylo Lobur

DSc., professor
head of the Computer Aided Design Department
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: 0000-0001-7516-1093
mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua

METHOD OF ADAPTATION OF BATMAN PROTOCOL FOR BLE L3 MESH NETWORK

Abstract. The paper considers adapting the decentralized routing protocol BATMAN for use in BLE L3 mesh networks, a relevant direction for the development of wireless IoT systems with limited resources. An analysis of existing approaches to routing in BLE Mesh is conducted, and the features of BATMAN's operation and its modern implementation, BATMAN-adv, are also investigated. It is established that the classical protocol model, focused on the L2 level and supporting bidirectional connections, cannot be directly transferred to the BLE environment due to technology limitations, in particular, the lack of native unicast, the small size of advertising packets, and the lack of delivery confirmation. An approach to adapting BATMAN for BLE L3 is proposed, based on controlled flooding for data and OGM service message transmission. The structures of packets encapsulated in advertising messages, as well as a mechanism for evaluating route quality based on OGM statistics, are developed. Particular attention is paid to selecting optimal scanning and advertising parameters, which significantly affect network efficiency and packet loss. The work also proposes a hybrid routing model that combines proactive and reactive approaches. Computer modeling using Python scripts was performed, enabling us to study network behavior under different parameter configurations, including node count, mobility, and traffic intensity. The results showed that the hybrid mode provides more stable data transmission delay and significantly reduces service traffic compared to purely proactive and reactive protocols. In particular, in balanced networks, the amount of service traffic is reduced by up to 1.4 times compared to the proactive approach and by up to 22 times compared to the reactive one. The results obtained confirm the possibility of effective adaptation of the BATMAN protocol for BLE mesh networks while maintaining its main advantages—decentralization, scalability, and resistance to topology changes. The proposed approach can serve as a basis for building energy-efficient, reliable next-generation IoT networks.

Keywords: BATMAN, BLE mesh, routing, IoT, flooding, OGM, hybrid protocol, wireless network.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Singh, U., Sharma, S. K., Shukla, M., & Jha, P. (2024). Blockchain-based BATMAN protocol using mobile ad hoc network (MANET) with an ensemble algorithm. *International Journal of Information Security*, 23(3), 1667–1677. <https://doi.org/10.1007/s10207-023-00804-w>
2. Kiran, K., Kaushik, N. P., Sharath, S., Shenoy, P. D., Venugopal, K. R., & Prabhu, V. T. (2018). Experimental evaluation of BATMAN and BATMAN-Adv routing protocols in a mobile testbed. In *2018 IEEE Region 10 Conference (TENCON)* (pp. 1538–1543). <https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650222>
3. Yilmaz, I., Jagadeesan, A. P., Zhang, J., Rischke, J., Nguyen, G. T., & Fitzek, F. H. P. (2025). Evaluation of end-to-end connection recovery after traffic path disruption in BATMAN mesh networks. In *2025*



- IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/WCNC61545.2025.10978701>
4. Hortelano, D., Olivares, T., Ruiz, M., Garrido-Hidalgo, C., & López, V. (2017). From sensor networks to Internet of Things: Bluetooth Low Energy as a standard for this evolution. *Sensors*, 17(2), 372. <https://doi.org/10.3390/s17020372>
 5. Darroudi, S., & Gomez, C. (2017). Bluetooth Low Energy mesh networks: A survey. *Sensors*, 17(7), 1467. <https://doi.org/10.3390/s17071467>
 6. Baert, M., Rossey, J., Shahid, A., & Hoebeke, J. (2018). The Bluetooth mesh standard: An overview and experimental evaluation. *Sensors*, 18(8), 2409. <https://doi.org/10.3390/s18082409>
 7. Darroudi, S. M., Gomez, C., & Crowcroft, J. (2020). Bluetooth Low Energy mesh networks: A standards perspective. *IEEE Communications Magazine*, 58(4), 95–101. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900523>
 8. Wang, L., Li, J., & Li, M. (2024). A rapid flooding approach based on adaptive delay and low-power sleep for BLE mesh networks. *IEEE Access*, 12, 65323–65332. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3398348>
 9. Villa, D., Lin, C.-K., Kuenzi, A., & Lang, M. (2022). Bluetooth Low Energy mesh network for power-limited, robust and reliable IoT services. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.04050>
 10. Belli, A., Esposito, M., Raggiunto, S., Palma, L., & Pierleoni, P. (2025). Relaying mechanisms in BLE mesh networks: A method for improving latency and reliability. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(12), 22282–22297. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3550831>
 11. Mohammed, H. S., Mustafa, H. K., & Abdulkareem, O. A. (2025). Enhancing wireless sensor networks with Bluetooth Low Energy mesh and ant colony optimization algorithm. *Algorithms*, 18(9), 571. <https://doi.org/10.3390/a18090571>
 12. Lin, J., Liu, Z., & Dai, J. (2019). Research and optimization of wireless mesh network routing protocol with multiple criteria. In *2019 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)* (pp. 72–78). <https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997932>
 13. Fehnker, A., Chaudhary, K., & Mehta, V. (2018). Improving the B.A.T.M.A.N. protocol through formal modelling and analysis. In A. Dutle et al. (Eds.), *NASA formal methods* (pp. 164–178). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77935-5_12
 14. Chache, F. M., Maxon, S., Narayanan, R. M., & Bharadwaj, R. (2021). QoS extension to a B.A.T.M.A.N.-based LoRa mesh network. In *2021 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)* (pp. 43–48). <https://doi.org/10.1109/MILCOM52596.2021.9653022>
 15. M, D. (2019). Performance evaluation of routing algorithm for MANET based on machine learning techniques. *Journal of Trends in Computer Science and Smart Technology*, 1(1), 25–38. <https://doi.org/10.36548/jtcsst.2019.1.003>
 16. Sliwa, B., Falten, S., & Wietfeld, C. (2019). Performance evaluation and optimization of B.A.T.M.A.N. V routing for aerial and ground-based mobile ad hoc networks. In *2019 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)* (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2019.8746361>
 17. Klein, A., Braun, L., & Oehlmann, F. (2012). Performance study of the B.A.T.M.A.N. protocol in the context of asymmetric links. In *2012 IEEE WoWMoM* (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2012.6263783>
 18. Anas, N. M., Hashim, F. K., Mohamad, H., Baharudin, M. H., & Sulong, M. P. (2015). Performance analysis of outdoor wireless mesh network using B.A.T.M.A.N. advanced. In *2015 IEEE SNPD* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/SNPD.2015.7176189>
 19. Nordic Semiconductor. (n.d.). *Is it possible to scan and advertise at the same time?* <https://devzone.nordicsemi.com/f/nordic-q-a/75305/is-it-possible-to-scan-and-advertise-at-the-same-time>

Отримано редакцією журналу / Received: 28.01.26

Прорецензовано / Revised: 15.02.26

Схвалено до друку / Accepted: 26.03.26

