

МІХНЕНКО ЯРОСЛАВ

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0000-0001-8440-2514>

e-mail: yaroslavmikhnenko@gmail.com

КОНОНОВА ІРИНА

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0009-0004-3736-4761>e-mail: viti21@ukr.net

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВУЗЬКОСМУГОВИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СІТЧАСТИХ МЕРЕЖ

У статті розглянуто проблему оцінювання продуктивності вузькосмугових безпроводових сітчастих мереж, які є основою для створення високонадійних систем зв'язку в умовах обмежених ресурсів радіочастотного спектра. Особливу увагу приділено вивченню особливостей роботи мереж у режимах ретрансляційного вузла. Встановлено, що ефективність функціонування вузькосмугових безпроводових сітчастих мереж суттєво залежить від налаштувань параметрів передачі даних: розміру повідомлень, швидкості модуляції, застосування механізмів коротких підтверджень і прямого виправлення помилок.

Запропоновано системний підхід до оцінювання ключових параметрів мережевої продуктивності: швидкості передачі даних, часу пересилання пакетів, ймовірності успішної доставки повідомлень та наведені розрахункові співвідношення для визначення часу передачі пакетів і бітрейту корисного навантаження з урахуванням службової інформації.

Окрему увагу приділено механізму підтвердження доставки пакетів через коротке повідомлення підтвердження отримання пакету даних, зокрема впливу повторних передач на загальну пропускну здатність мережі. Показано, що застосування схем прямого виправлення помилок сприяє зменшенню впливу завад радіоканалу і підвищенню надійності зв'язку, проте збільшує загальний час передачі даних.

Результати дослідження дозволяють формувати рекомендації щодо оптимізації параметрів мережі та демонструють чітку залежність між технічними характеристиками передачі та ефективністю функціонування мережі для забезпечення гарантованої доставки повідомлень. Отримані вимірювання ключових параметрів забезпечують підґрунтя для об'єктивного та прискореного аналізу продуктивності вузькосмугових безпроводових сітчастих мереж у прикладних умовах, а також підтверджують доцільність використання запропонованого підходу для підвищення точності та інформативності оцінювання.

Ключові слова: вузькосмугові безпроводові сітчасті мережі, пакети даних, оцінювання ефективності, виправлення помилок, ефективність функціонування.

MIKHLENKO YAROSLAV**KONONOVA IRYNA**

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

A METHOD FOR IMPROVING THE PERFORMANCE EVALUATION OF NARROWBAND WIRELESS MESH NETWORKS

The article deals with the problem of evaluating the performance of narrowband wireless mesh networks, which are the basis for creating highly reliable communication systems in conditions of limited radio frequency spectrum resources. Particular attention is paid to the study of the peculiarities of network operation in the relay node modes. It is established that the efficiency of narrowband wireless mesh networks significantly depends on the settings of data transmission parameters: message size, modulation rate, use of short acknowledgments and direct error correction mechanisms.

A systematic approach to evaluating the key parameters of network performance is proposed: data transmission rate, packet transmission time, probability of successful message delivery, and calculation relations for determining the packet transmission time and payload bitrate with regard to service information are given.

Particular attention is paid to the mechanism of confirming the delivery of packets through a short message of confirmation of receipt of a data packet, in particular, the impact of retransmissions on the overall network throughput. It is shown that the use of direct error correction schemes helps to reduce the impact of radio channel interference and improve communication reliability, but increases the overall data transmission time.

The results of the study allow us to formulate recommendations for optimizing network parameters and demonstrate a clear relationship between transmission characteristics and network performance to ensure guaranteed message delivery. The obtained measurements of key parameters provide the basis for an objective and accelerated analysis of the performance of narrowband wireless mesh networks in applied conditions, and also confirm the feasibility of using the proposed approach to improve the accuracy and informativeness of the assessment.

Keywords: narrowband wireless mesh networks, data packets, performance evaluation, error correction, performance.

Стаття надійшла до редакції / Received 13.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Вузькосмугові безпроводові сітчасті мережі (ВБСМ), становлять собою перспективну технологічну основу для створення високонадійних систем зв'язку в умовах обмежених ресурсів радіочастотного спектра. Завдяки своїй енергоефективності, високій дальності дії та можливості автономної самоорганізації вузлів без потреби у фіксованій інфраструктурі, такі мережі набули широкого застосування в задачах моніторингу, управління, телеметрії та дистанційного контролю. Водночас ефективність функціонування ВБСМ значною мірою залежить від оптимального налаштування критичних параметрів передачі даних, таких як розмір повідомлень, швидкість модуляції, затримка пересилання, використання механізмів короткого повідомлення

підтвердження отримання пакету даних (ACK, Acknowledgment) та прямого виправлення помилок (FEC, Forward Error Correction), а також характеристик каналу зв'язку [1, 2].

Наукова проблема полягає в необхідності розробки об'єктивних та оперативних методів оцінювання продуктивності вузькосмугових безпроводових мереж, які б враховували реальні умови експлуатації, вплив параметрів передачі на ефективність обміну даними та забезпечували можливість гнучкої оптимізації мережевої конфігурації. Особливо актуальним є вивчення поведінки мереж у режимах моста і маршрутизатора, де відмінності в обробці трафіку можуть суттєво впливати на загальну продуктивність і якість обслуговування.

З практичного погляду вирішення цієї проблеми має важливе значення для розроблення і вдосконалення таких систем як SCADA, телеметрія, метеорологічних станцій, інтелектуальних енергомереж та інших об'єктів критичної інфраструктури, які потребують гарантованої доставки даних у складних радіочастотних умовах. Забезпечення високої надійності та ефективності передачі даних в умовах обмеженої пропускну здатності і впливу завад є ключовою передумовою для стабільної роботи таких систем.

Таким чином, дослідження ефективних методів оцінювання продуктивності ВБСМ із врахуванням технічних параметрів передавання є актуальним як у науковому, так і в практичному аспектах, і сприяє підвищенню ефективності побудови сучасних безпроводових інфраструктур управління та контролю.

Аналіз досліджень та публікацій

В роботі [3] представлено, що для організації безпроводової передачі великої кількості коротких повідомлень радіомодеми становлять ефективне технічне рішення, особливо в умовах, які вимагають гарантованої доставки даних. Однією з переваг сучасних радіомодемів є підтримка функціоналу віддаленого налаштування та централізованого керування, що забезпечує гнучкість у процесі розгортання мережі та її обслуговування.

Авторами [5] проаналізовано, як механізми короткого повідомлення підтвердження отримання пакету даних та прямого виправлення помилок впливають на продуктивність передачі повідомлень різного розміру. У роботах [10] представлено серію вимірювань, які порівнюють довжину пакета та швидкість передачі даних, а також досліджено ефективність застосування вузькосмугових радіочастотних технологій у реальних топологіях безпроводових мереж. Автори продемонстрували, як змінюється затримка проходження пакета в обох напрямках в залежності від його довжини та швидкості модуляції, зокрема як при використанні FEC, так і без нього.

Автори роботи [6] експериментально довели, що розмір даних значно впливає на час пересилання, який зростає зі збільшення довжини пакета. У дослідженні [11] проаналізовано вплив розміру пакета на кінцевий бітрейт у безпроводових реальних часом програмах, що використовують вузькосмугові радіочастотні сітчасті мережі. У [13] експериментально продемонстровано вплив розміру повідомлення в низхідній і висхідній лініях зв'язку на затримку проходження туди й назад. Цей ефект аналізується як із використанням прямого виправлення помилок так і без нього.

Проте існуючий науково-методичний апарат не дає змоги повною мірою здійснювати оцінювання продуктивності вузькосмугових безпроводових сітчастих мереж за рахунок ідентифікації та коригування ключових параметрів.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є підвищення оцінювання продуктивності вузькосмугових безпроводових сітчастих мереж.

Виклад основного матеріалу

Для оцінювання продуктивності вузькосмугових безпроводових сітчастих мереж запропоновано використання наступних показників, таких як модуляція, бітова швидкість та час пересилання пакетів, а також критичні атрибути якості, які забезпечують швидку та зручну оцінку безпроводової продуктивності маршрутизатора. Важливо відзначити, що розглядається лише один зв'язок, без урахування багатострибкових мереж.

Маршрутизатори радіостанцій підтримують кілька варіантів налаштування модуляції для всіх базових станцій, що забезпечує адаптацію до різних регуляторних вимог. Відповідно, швидкість модуляції визначається конкретними обмеженнями параметрів переданого сигналу, модуляції з безперервною фазовою частотною маніпуляцією демонструють приблизно на 20% більшу девіацію частоти порівняно з вимогами стандартів Європейської комісії, що забезпечує підвищену чутливість приймача на 1–2 дБ за аналогічної швидкості передачі даних. Відповідно до рекомендації ITU-R SM.328, смуга пропускання сигналу маршрутизатора шириною 16 кГц охоплює 99% загальної інтегрованої потужності переданого спектра в межах каналу шириною 25 кГц у режимі який визначає відстань або різницю між частотами каналів у частотному діапазоні і який використовуються для передачі даних.

У контексті лінійних методів модуляції диференціально закодовані формати, зокрема $\pi/4$ -DQPSK, D8PSK і 16-DEQAM, зазнають суттєвого впливу в умовах поширення сигналу через вузькосмугові радіоканали. Водночас індекс модуляції відіграє ключову роль в ідентифікації форматів модуляції, таких як 2CPFSK і 4CPFSK, що є оптимальними представниками сімейства нелінійних модуляцій. Загальне співвідношення між швидкістю модуляції та максимальною девіацією частоти визначається наступним чином:

$$h = 2\Delta f / R(M - 1),$$

де R – швидкість модуляції, M – кількість станів модуляції, Δf – максимальне відхилення частоти, що представляє положення частоти крайнього символу.

З іншого боку, використання квадратурної амплітудної модуляції (QAM) має важливу перевагу, оскільки завдяки своїй високій порядковості дозволяє передавати більшу кількість бітів на символ. Незважаючи на широке застосування QAM у системах моніторингу зв'язку, її ефективність найбільш помітна в умовах стабільного радіосередовища, де можлива реалізація підвищених швидкостей передачі даних. Водночас реалізація таких схем модуляції вимагає підтримки вищої вихідної потужності радіочастотного сигналу.

Переходимо до механізму прямого виправлення помилок. У безпроводових мережах, таких як WLAN та WiMAX, традиційні методи FEC сприяють підвищенню ефективності двосторонньої передачі даних у конфігураціях з односкоковим зв'язком [21]. Механізм FEC [14] передбачає додавання надлишкової інформації до вихідного коду перед передаванням, що дозволяє приймачеві виявляти й коригувати помилки під час цифрової передачі даних. У разі незначних втрат інформації застосування відповідних схем декодування забезпечує її успішне відновлення [15]. Крім того, використання FEC сприяє зменшенню впливу радіоканальних спотворень, що, у свою чергу, підвищує загальну надійність безпроводового зв'язку.

Щоб зменшити помилки, спричинені радіоканалом, необхідно застосовувати відповідні методи корекції. Якщо позначити bbb як швидкість модуляції, тоді швидкість передачі даних користувача визначається як $D = b \cdot FECD$, де bbb (швидкість модуляції) – параметр, що вказує на кількість бітів, які можуть бути передані за один символ модуляції, а $FECD$ (частота підключення до каналу/частота символів) – параметр, що позначає частоту, з якою передаються символи в каналі. При цьому корисна швидкість передачі даних зазвичай нижча за номінальну швидкість, яку може забезпечити мережа, оскільки частина пропускної здатності витрачається на корекцію помилок та інші службові процеси.

Далі приймаючий маршрутизатор зобов'язаний підтвердити успішне отримання пакета за допомогою механізму підтвердження та повторної передачі. Передача короткого службового повідомлення ACK через радіоканал сигналізує про коректну доставку даних. У випадку відсутності такого підтвердження, ініціюється повторна передача пакета, згідно з попередньо визначеним числом допустимих спроб.

Слід зауважити, що застосування механізму ACK вимагає додаткового використання пропускної здатності мережі, зокрема для обробки повторних передач втрачених або пошкоджених кадрів [13]. Крім того, довжина переданих пакетів у таких мережах є змінною й залежить як від специфіки мережної архітектури, так і від особливостей застосованого протоколу зв'язку.

Прийmemo, що ймовірність того, що переданий біт неправильний t_n , а $(1 - t_n)$ це ймовірність того, що біт передано правильно, тобто ймовірність того, що ACK успішно передано, дорівнює $P_o(1 - t_n)^X$, де X – біт ACK.

Отримання підтвердження ACK від вузла-приймача не є обов'язковим у випадках, коли пакет передається одноразово без реалізації механізму повторної передачі. Водночас у безпроводових сітчастих мережах механізм повторного підтвердження ACK відіграє важливу роль у забезпеченні стабільності функціонування радіопротоколу. Зазначений механізм може діяти незалежно від процедур повторної передачі, що реалізуються на вищих рівнях протокольної архітектури. При цьому він здатен використовувати максимальну доступну швидкість передачі даних, що сприяє підвищенню надійності зв'язку та зменшенню ймовірності втрати критичних даних.

У свою чергу на загальну продуктивність мережі суттєво впливає обсяг двійкових даних, що передаються через безпроводовий канал і безпосередньо залежить від розміру пакета та часу його передачі. Основне корисне навантаження транспортується у складі пакета або відповідного блоку даних, не враховуючи службову інформацію, необхідну для забезпечення маршрутизації. Кожен переданий пакет містить заголовок, який включає IP-адреси джерела та призначення. В статті прийняли, що бітрейт корисного навантаження IP-пакетів, що передаються маршрутизаторами через радіоканал, будемо обчислювати з урахуванням 28 байтів службової інформації, де 20 байтів становить заголовок IP-протоколу, а 8 байтів заголовок UDP.

Розмір пакетів у мережах передачі даних підлягає певним технічним обмеженням, що детально описані у [16]. У межах каналу зв'язку розмір пакета зазвичай вимірюється в байтах, тоді як максимальна одиниця передачі визначає найбільший дозволений обсяг пакета, який може бути переданий без фрагментації. У більшості сучасних мереж стандартне встановлено на рівні 1500 байт, що вважається типовим для мереж доступу й відповідає технічним вимогам протоколів мережевого рівня.

Для одночасної передачі на одній частоті та прийому на іншій у вузькосмуговій телеметрії зазвичай використовується повнодуплексна конфігурація. Розглянемо системну модель яка поділяється на дві мережеві топології: передача через Інтернет та передача через маршрутизатори та проаналізуємо другу топологію.

Час пересилання при аналізі каналу з одним стрибком це середній час, потрібний для передачі одного пакета між двома модулями радіомаршрутизатора (рис. 1).

Під час цього процесу пакети проходять обробку, комутацію та постановку в чергу. Час передачі пакета РТТ, що означає процес передачі даних, який відбувається за допомогою технології «Push-To-Talk», де користувач ініціює передачу інформації, через радіоканал (у секундах) можна визначити залежно від його розміру [15].

Розглянемо прямий шлях з одним стрибком між вузлом 1 та вузлом 2.

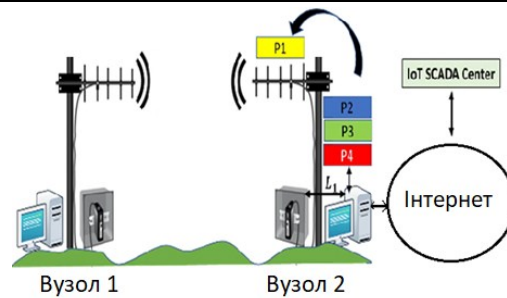


Рис.1. Продуктивність для мережі з комутацією пакетів

Для прикладу було проаналізовано, конфігурацію маршрутизатора, що здійснює передачу окремого пакета від головного радіомодема до віддаленого термінального пристрою. Вихідне повідомлення, що надходить від центру управління SCADA, передається до вузла 1, після чого проходить через різні маршрутизатори глобальної мережі Інтернет до досягнення кінцевого вузла 2 (рис. 1).

Центр SCADA забезпечує оперативний контроль над місцем технічного підключення через Інтернет. Він надсилає запити послідовно до пристрою, що відповідає за збір даних, а пакети, що виходять із центру SCADA, передаються мережею Інтернет. Головний радіомодем працює в дуплексному режимі, а передача даних триває безперервно, поки центр SCADA відправляє та отримує пакети. Запропонована модель операційної системи, представлена на рис. 1, має дальність зв'язку понад 50 км.

Припустимо, що всі пакети одного повідомлення проходять однаковий маршрут, як показано на рис. 1. Якщо вважати, що час передачі та обробки дорівнює нулю, то єдиним фактором, що впливає на продуктивність, є час передачі пакетів у середовищі і розглянемо окремий пакет, що передається від вузла 1 до вузла 2. Передавачі, які використовують цифрову модуляцію, повинні забезпечувати швидкість передачі даних щонайменше 4,8 кбіт/с із смугою пропускання 6,25 кГц або голосовий канал із смугою 12,5 кГц. Розмір повідомлення $L(y)$ складається з z пакетів, що передаються через різні безпроводові середовища зі сталою швидкістю H біт/с.

Припустимо, що вузол 1 починає передачу пакета Z_1 в момент часу $t = 0$ по лінії L_1 . Вузол 2 отримує цей пакет $t_0 + t_n$, де t_n - час передачі пакету. Припустимо, що час обробки у вузлі дорівнює 0. Пакет повторно передається негайно на вузлі 2, тоді як пакет 2 передається на L_1 . Якщо W — кількість вузлів, пакет 1, Z_1 досягає вузла призначення в $(W+1)t_n$, а якщо z — кількість пакетів, останній надісланий пакет — $(z-1)t_n$. Останній пакет надходить у $(z-1)t_n + (W+1)t_n$, що відповідає завершенню передачі. Знову $t_n(z+W)$. Враховуючи $t_n = \frac{L}{zH}$, отримуємо час перетину мережі Z_n , $Z_n = \left(\frac{L}{zH}\right)(z+W)$, або:

$$Z_n = \left(\frac{L}{H}\right)\left(1 + \frac{W}{z}\right) \quad (1)$$

Однак ця формула не враховує дані протоколу H , які слід додати до кожного пакету. Таким чином,

$$Z_n = \frac{(L+zH)}{H\left(1+\frac{W}{z}\right)} \quad (2)$$

Час проходження в мережі навіть нижчий, ніж малість фактора W . Вплив розміру заголовка служби не є незначним.

Для подолання перешкод прямої видимості в радіо-каналах або для розширення зони покриття використовуються мости. Режим "Міст" оптимізовано для роботи за схемою "головний-підлеглий", що забезпечує ефективну взаємодію між пристроями. IP-адреси таких пристроїв асоціюються з локальними, віддалено керованими або телеметричними системами, зокрема такими, як SCADA Center, які функціонують за протоколом опитування (рис. 2).

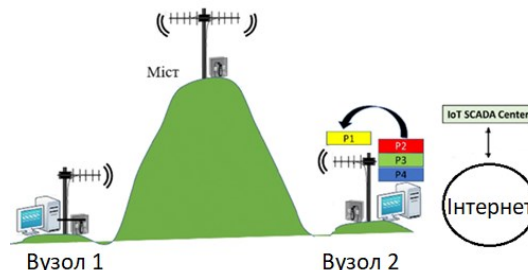


Рис. 2. Варіант схеми моста

Будь-який пристрій у режимі моста може бути налаштований як повторювач. Його основна функція — ретрансляція всіх отриманих пакетів через радіоканал. Однак він також виконує роль простого пристрою, забезпечуючи належний рівень зв'язку та ефективне використання спектру в безпроводових мережах малого або середнього розміру. У режимі моста очікувана пропускна здатність системи (H (кбіт/с)) визначається як відношення обсягу переданих даних за певний часовий інтервал t до самого інтервалу t при $t \rightarrow \infty$:

$$H = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{(z(t) \text{ packet_length})}{t}, \quad (3)$$

де $z(t)$ дає нам кількість пакетів, переданих у системі, а довжина пакету це розмір пакетів, припускаючи, що всі вони однакові. Зауважте, що кількість пакетів, $p(t)$, поділена на t , дорівнює оберненій до очікуваного часу обслуговування пакетів, коли t наближається до нескінченності.

Таким чином, $H = \frac{\text{packet_length}}{T}$, де T є середньою затримкою передачі, за винятком фази довільного доступу, яка має місце перед призначенням каналу висхідної лінії зв'язку. Однак слід зазначити, що кількість двійкових інформаційних об'єктів, які канал може надіслати за одиницю часу, становить: $\lambda = \frac{W_n}{T}$, де W_n – середня кількість пакетів у системі, T – середня кількість часу, який пакет проводить у системі, а λ – також швидкість надходження пакетів. Отже, необхідно враховувати розмір кадру відповіді, довжину службових даних радіопротоколу та швидкість модуляції. Отримані результати базуються на вимірюваннях продуктивності безпроводової сітчастої мережі, які важливі не лише для надання швидкого огляду продуктивності, але й для забезпечення успішної роботи програми користувача.

Запропонована система складається з двох основних компонентів: апаратного забезпечення та програмного забезпечення для керування. Безпроводова система зв'язку оптимізована для зменшення кількості пристроїв, що використовуються для внутрішнього зв'язку. Апаратна частина включає блок моніторингу даних, центр моніторингу та модуль безпроводової передачі. Програмне забезпечення забезпечує користувачам доступ до основної інформації, можливостей налаштування конфігурацій, статистики, записів про помилки, моніторингу в реальному часі, а також нагадувань про технічне обслуговування. Апаратна та програмна частини включають всеспрямовану антену, що призначена для базових радіостанцій у діапазоні 158–174 МГц. Передавальна антена має всеспрямовану діаграму спрямованості з коефіцієнтом посилення 3 дБ. Радіомаршрутизатор забезпечує змінну вихідну потужність у діапазоні від 0,1 до 10 Вт, а рівні сигналу на кожній ділянці варіюються від 38 до 70 дБмкВ. Час обробки визначається як період, необхідний пристроям для обробки запитів. Радіомодеми у вузлах 1 і 2 мають однакову швидкість інтерфейсу та ідентичні параметри.

На основі вихідних даних та отриманих результатів проведемо спостереження та вимірювання режиму безпроводового маршрутизатора. Використаємо запропонований варіант моделі (рис. 2). Бітрейт корисного навантаження безпроводових сітчастих мереж з одним стрибком для різних розмірів пакетів представлено на рис. 3.

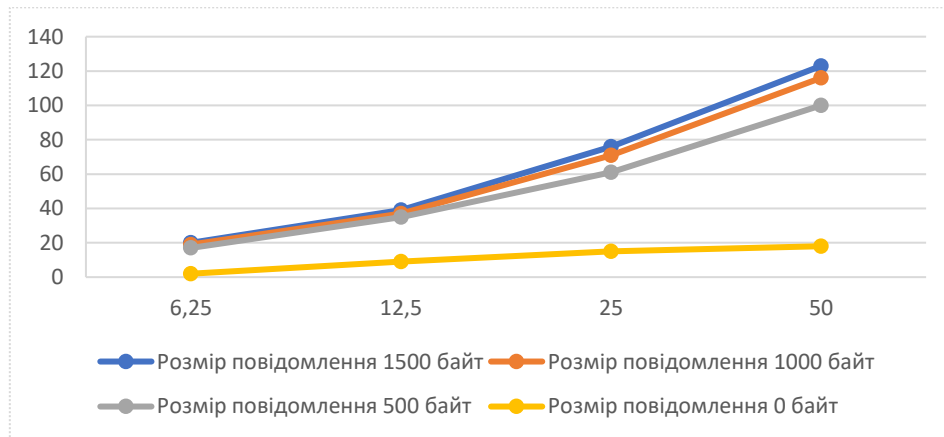


Рис. 3. Бітрейт корисного навантаження (кбіт/с) порівняно з відстанню між каналами в частотному діапазоні (кГц) для різних фіксованих розмірів повідомлень

Відповідно до отриманих результатів (рис. 3), бітова швидкість корисного навантаження збільшується зі збільшенням значень відстані між каналами в частотному діапазоні. Крім того, виявлено, що при збільшенні розміру повідомлення бітрейт корисного навантаження значно зростає.

Криві на рис. 4 ілюструють зміну бітрейту корисного навантаження для різних розмірів пакетів та відстаней між каналами в частотному діапазоні відстані (CS) від 6,25 до 50 кГц.

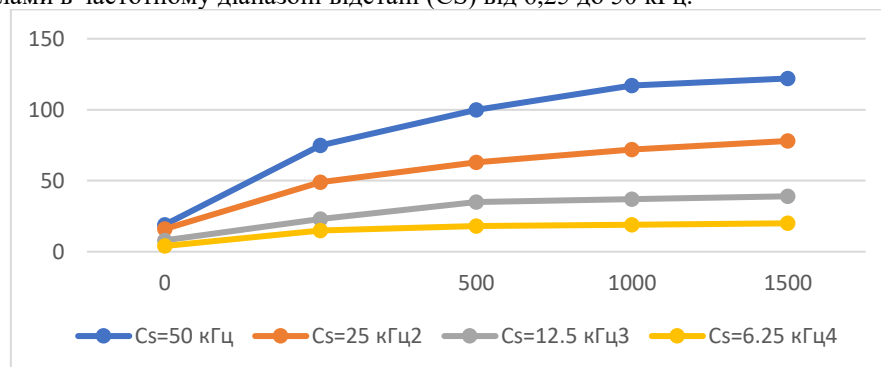


Рис. 4. Вплив розміру повідомлення на бітрейт корисного навантаження залежно від каналу рознесення

Вплив різних розмірів пакетів на бітрейт корисного навантаження мережі представлено графічно на рис. 5. На початковому етапі зі збільшенням розміру пакета бітрейт корисного навантаження також зростає, досягаючи максимального значення при розмірі пакета 1500 біт. Це свідчить про те, що канал рознесення відіграє важливу роль у визначенні продуктивності мережі.

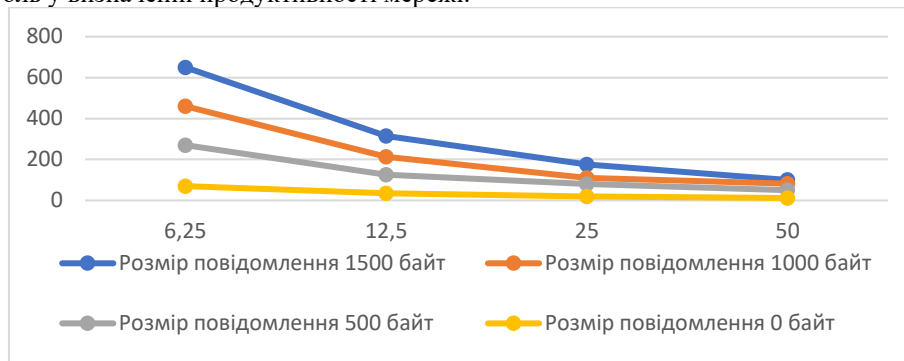


Рис. 5. Залежність часу пересилання (мс) від відстані у частотному діапазоні (кГц) для різних фіксованих розмірів повідомлення

Вимірювання часу пересилання здійснюється шляхом використання змінної відстані між каналами в частотному діапазоні для передачі одного пакета, що дозволяє кількісно оцінити вплив шумової смуги на розмір повідомлення. Як показано на рис. 5, зі збільшенням відстані у CS час пересилання зменшується. Однак, починаючи з 25 кГц, спостерігається незначне зростання часу переадресації.

На рисунку 6 можна побачити, як змінюється час пересилання залежно від середнього розміру повідомлення відповідно до фіксованої відстані у частотному діапазоні.

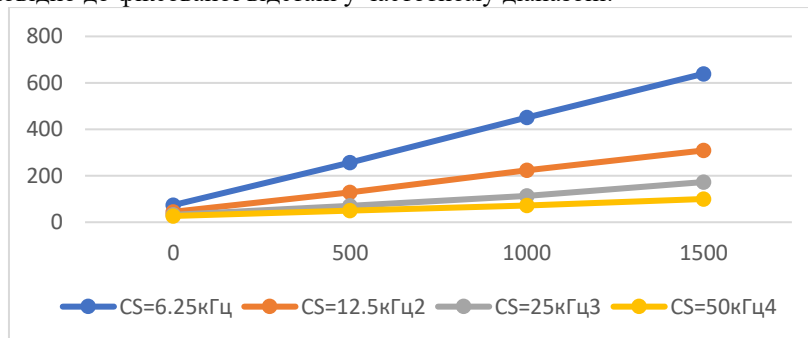


Рис. 6. Представлення часу передачі (мс) для підключення до стрибка в порівнянні з режимом ретрансляційного вузла

Отже, час передачі збільшується лінійно із зростанням середнього розміру повідомлення, як показано на рис. 6. Порівняльні вимірювання на цьому графіку демонструють, що при відстані у CS 50 кГц спостерігається значне покращення середнього часу передачі у порівнянні з іншими значеннями відстані у частотному діапазоні. Крім того, отримані результати свідчать, що рознос каналів 50 кГц суттєво впливає на зменшення середнього часу передачі повідомлень (мс) у порівнянні з розносом каналів відстані у частотному діапазоні: 6,25 кГц, 12,5 кГц і 25 кГц.

Повна модель, показана на рис. 2, використовується з використанням моделі мосту. Результати бітрейту корисного навантаження/часу пересилання в порівнянні з CS/розмірами повідомлень показано на рис. 7, 8 і 9.

На рис.7 порівнюється бітрейт корисного навантаження з CS вузла (вузол мосту) між двома статичними вузлами (1 і 2) шляхом встановлення різних значень розміру повідомлення. Міст лише пересилає пакети між вузлом 1 та вузлом 2.

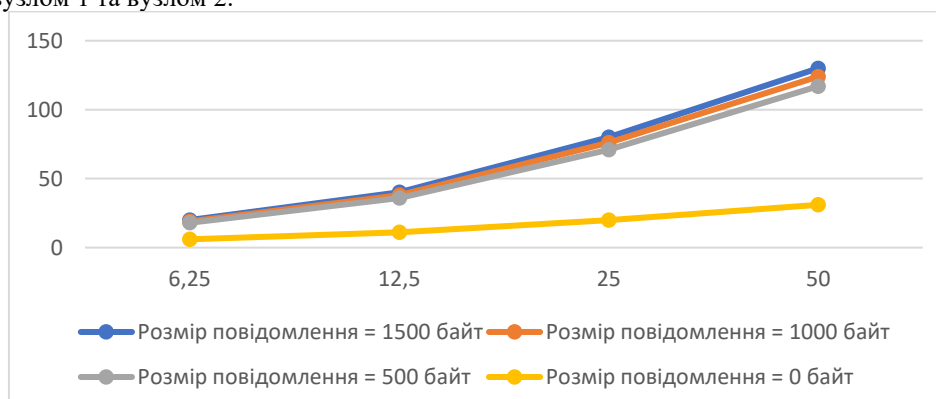


Рис. 7. Бітрейт корисного навантаження (кбіт/с) порівняно з CS (кГц) для різних фіксованих розмірів повідомлень

З результатів, показаних на рис. 7, можна спостерігати, що бітрейт корисного навантаження збільшується зі збільшенням значень CS. Бітрейт корисного навантаження помітно збільшується залежно від збільшення розміру повідомлення. Потім цю швидкість можна покращити завдяки режиму мосту з каналом і середньому розміру залучених повідомлень. Криві на рис. 8 ілюструють зміну бітрейту корисного навантаження, а також режим мосту для різних розмірів пакетів і CS в діапазоні від 6,25 до 50 кГц.

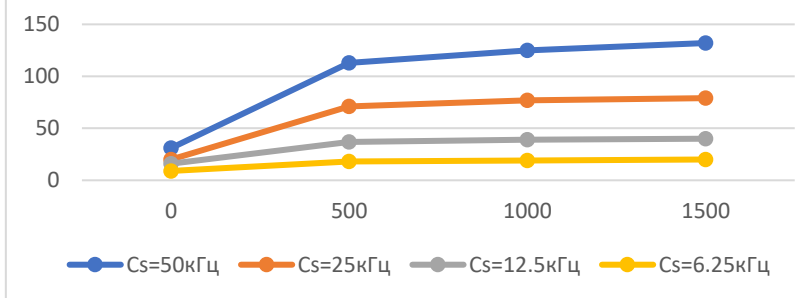


Рис. 8. Вплив розміру повідомлення на бітрейт корисного навантаження залежно від CS

Як видно на рис. 8, бітова швидкість корисного навантаження значно зростає при CS=50 кГц, а CS=25 кГц трохи збільшується з наступним інтервалом каналів: CS = 12,5 кГц і CS = 6,25 кГц.

На рис. 9 показано порівняння результатів часу пересилання за один стрибок, отриманих шляхом розгляду різних фіксованих розмірів повідомлень. Режим моста може виконувати час передачі на основі середнього розміру повідомлення в безпроводових сітчастих мережах.

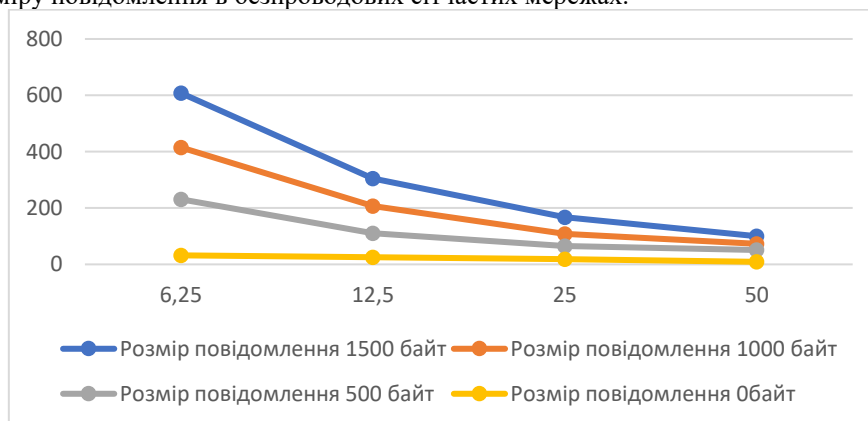


Рис. 9. Час пересилання (мс) проти CS (кГц) для різних фіксованих розмірів повідомлення

Результати, представлені на рис. 10, показують, що час передачі збільшується зі збільшенням значень CS. Тим не менш, збільшення розміру повідомлення також може призвести до значного збільшення часу передачі.

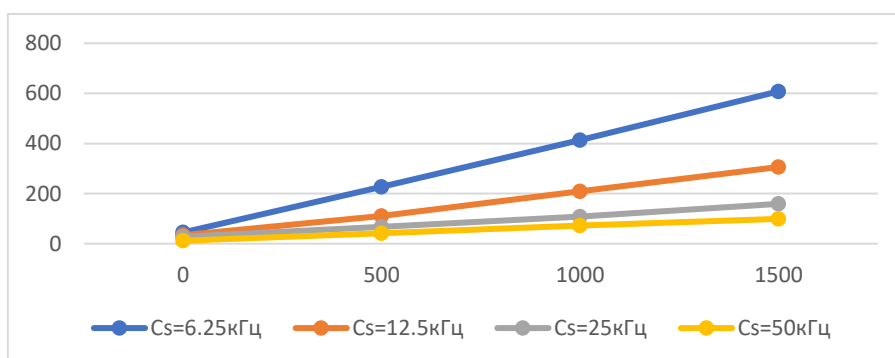


Рис. 10. Залежність часу пересилання (мс) для з'єднання з одним кроком у порівнянні із середнім розміром повідомлення

Режим мосту може покращити час пересилання залежно від розміру повідомлення та фіксованого CS.

На рис. 11 представлені результати швидкості модуляції в порівнянні з CS для лінійної та експоненціальної модуляції.

Швидкості модуляції для форматів QAM [лінійні (QAM): 16-DEQAM, D8PSK, $\pi/4$ -DQPSK, DPSK] і FSK [експоненціальні (FM): 4CPFSK, 2CPFSK] суттєво зростають зі збільшенням CS. Також було відзначено, що використання вищих швидкостей модуляції може значно підвищити швидкість передачі даних, однак це супроводжується зменшенням радіусу покриття та зниженням чутливості приймача.

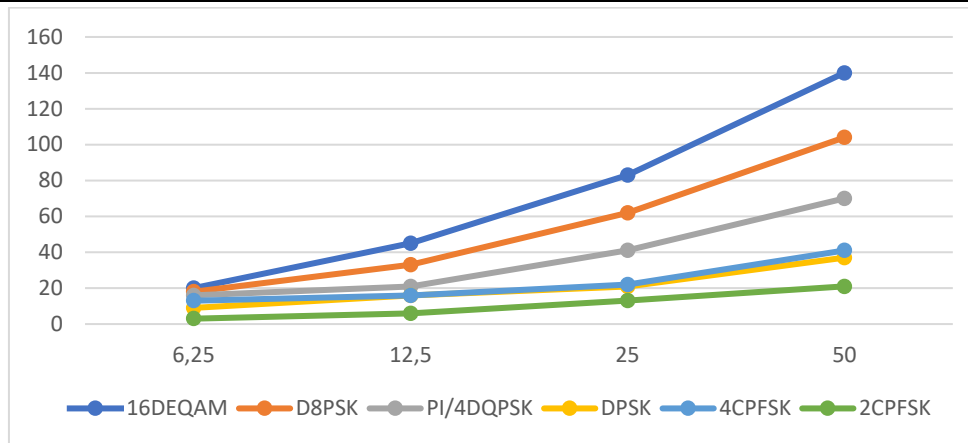


Рис. 11. Швидкості модуляції порівняно з CS для різних форматів модуляції

На основі отриманих результатів представимо в табл. 1 порівняння експериментальних вимірів – режим маршрутизатора та режиму моста.

Таблиця 1

Порівняння експериментальних вимірів

Розмір повідомлення	Режим маршрутизатора		Режим мосту	
	500	1500	500	1500
Рознос каналу (кГц)	6.25	50	6.5	50
Час пересилання (мс)	258	100	230	94
Бітрейт корисного навантаження (кбіт/с)	16.35	122.45	18.35	130.23
16DEQAM (кбіт/с)	20.83	138.89	20.83	138.89
4CPFSK (кбіт/с)	5.21	41.67	5.21	41.67

Результати порівняння показують, що в режимах маршрутизатора або мосту зі збільшенням розміру повідомлення та CS зростають час пересилання та швидкість модуляції, тоді як бітрейт корисного навантаження зменшується. Водночас розмір повідомлення не впливає на швидкість модуляції—її підвищення спричиняє саме CS. У цьому випадку час пересилання збільшується на 38,76% у режимі маршрутизатора та на 40,86% у режимі мосту, тоді як швидкість передачі даних зменшується на 13,35% і 14,10% відповідно.

Слід зазначити, що порівняння результатів вимірювання та моделювання за допомогою режиму маршрутизатора або моста дає майже однаковий результат.

Висновки

У цій статті було проведено дослідження впливу розміру повідомлення та інтервалу каналів на кінцеві бітрейти, час пересилання та швидкість модуляції, базуючись на експериментальних даних. Під час симуляції один пакет передається з одним стрибком із використанням універсального радіомодему, що працює у режимах з'єднання або маршрутизації.

Запропонований метод оцінювання продуктивності додатків безпроводових сітчастих мереж дозволяє оперативно узагальнювати аналіз продуктивності додатків, використовуючи надійні метрики, такі як час пересилання за один стрибок, бітрейт корисного навантаження, розмір повідомлення, модуляцію, механізм короткого повідомлення для підтвердження отримання пакету даних, інтервал між каналами та максимальну одиницю передачі (MTU). критичних параметрів передачі даних, таких як розмір повідомлень, швидкість модуляції, затримка пересилання, використання механізмів короткого повідомлення підтвердження отримання пакету даних та прямого виправлення помилок.

Крім того метод передбачає порівняння з мостовим режимом, який спрямований на вирішення поширених проблем, що часто виникають у вузькосмугових безпроводових мережах, а саме підтримку критично важливих сервісів, так і функцію моніторингу мережі в реальному часі, що робить його універсальним та ефективним інструментом для оцінювання продуктивності мережевих додатків.

Література

1. Chatei Y. Narrow-band channel spacing frequencies metric in one-hop wireless mesh networks. [Electronic resource] / Y. Chatei, K. Ghomid, E.M. Ar-reyouchi // Communication and electronics systems. – 2017. – P. 296 – 301. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/cesys.2017.8321284>.
2. Ghadban A. A 60 GHz RoF generation system based on optical beat of narrowband Bragg filters. [Electronic resource] / A. Ghadban, K. Ghomid, D. Bria, A. Bouzidi, R. Kouddane, R. Yahiaoui // SN Appl Sci. – № 1(10):1188. – 2019. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1105-0>.

3. Chatei Y. Impact of message size on the average delay in narrowband wireless links: [Electronic resource] / Y. Chatei, M. Hammouti, A. Ghadban, S. Mekaoui, K. Ghoumid // ICEERE. – № 2. – P. 51 – 57. – 2019. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1405-6_8.
4. Ar-reyouchi E.M. Performance analysis of round trip time in narrowband RF networks for remote wireless communications. [Electronic resource] / E.M. Ar-reyouchi, K. Ghoumid, K. Ameziane // Int J Comput Sci Inf Technol IJCSIT. – №5 (5). –P. 1 – 20. – 2013. – Mode of access: <https://doi.org/10.5121/ijcsit.2013.5501>
5. Chatei Y. Effect of packet length on the resulting bitrate in narrowband wireless networks. [Electronic resource] / Y.Chatei, K. Ghoumid, H. Barboucha, O. Sefraoui // ICEERE. – № 1. – P. 13 – 27. – 2019. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1405-6_7.
6. Ar-reyouchi EM, Chatei Y, Ghoumid K, Lichioui () The powerful combined effect of forward error correction and automatic repeat reQuest to improve the reliability in the wireless communications. [Electronic resource] / International conference on computer science. – № 1. – P. 691–696. – 2015 – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/csci.2015.39>.
7. Chatei Y, Hammouti M, Ghadban A, Ar-reyouchi EM, Mekaoui S, Ghoumid K () Impact of message size on the average delay in narrowband wireless links. [Electronic resource] / Y. Chatei, M. Hammouti, A. Ghadban, K. Ghoumid // Lecture notes in electrical engineering. Springer. – № 519. – P. 217 – 229. 2019. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1405-6_8.
8. Chatei Y. Downlink and uplink message size impact on round trip time metric in multi-hop wireless mesh networks. [Electronic resource] / Y. Chatei, E. Ar-Reyouchi, K. Ghoumid // Int J Adv Comput Sci Appl IJACSA. – № 8(3). – P. 223 –229. – 2017. – Mode of access: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2017.080332>.
9. Ashjaei M. MTU assignment in a master-slave switched ethernet network. [Electronic resource] / M. Ashjaei, M. Behnam, L. Almeida, T. Nolte // Workshop on Real-Time Networks. 2013. Mode of access: https://www.es.mdu.se/pdf_publications/2943.pdf.
10. Pinals L. Link-state optimized decode-forward transmission for two-way relaying. [Electronic resource] / L.Pinals, M. Vu // Trans Commun. – № 4. – P. 1844 – 1860. – 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2530790>.
11. Shjaei M.A. MTU configuration for real-time switched Ethernet networks. [Electronic resource] / M.A. Shjaei, M.B. Behnam, L. Almeida, T.N. Nolte // J Syst Arch. – P. 15 – 25. – 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2016.04.009>.
12. Behnam M. Analysis and optimisation of the MTU in real-time communications over switched ethernet. [Electronic resource] / M. Behnam, R. Marau, P. Pedreiras // Emerging technologies and factory automation. – 2011. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/etfa.2011.6059021>.

References

1. Chatei Y. Narrow-band channel spacing frequencies metric in one-hop wireless mesh networks. [Electronic resource] / Y. Chatei, K. Ghoumid, E.M. Ar-reyouchi // Communication and electronics systems. – 2017. – P. 296 – 301. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/cesys.2017.8321284>.
2. Ghadban A. A 60 GHz RoF generation system based on optical beat of narrowband Bragg filters. [Electronic resource] / A. Ghadban, K. Ghoumid, D. Bria, A. Bouzidi, R. Kouddane, R. Yahiaoui // SN Appl Sci. – № 1(10):1188. – 2019. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1105-0>.
3. Chatei Y. Impact of message size on the average delay in narrowband wireless links: [Electronic resource] / Y. Chatei, M. Hammouti, A. Ghadban, S. Mekaoui, K. Ghoumid // ICEERE. – № 2. – P. 51 – 57. – 2019. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1405-6_8.
4. Ar-reyouchi E.M. Performance analysis of round trip time in narrowband RF networks for remote wireless communications. [Electronic resource] / E.M. Ar-reyouchi, K. Ghoumid, K. Ameziane // Int J Comput Sci Inf Technol IJCSIT. – №5 (5). –P. 1 – 20. – 2013. – Mode of access: <https://doi.org/10.5121/ijcsit.2013.5501>
5. Chatei Y. Effect of packet length on the resulting bitrate in narrowband wireless networks. [Electronic resource] / Y.Chatei, K. Ghoumid, H. Barboucha, O. Sefraoui // ICEERE. – № 1. – P. 13 – 27. – 2019. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1405-6_7.
6. Ar-reyouchi EM, Chatei Y, Ghoumid K, Lichioui () The powerful combined effect of forward error correction and automatic repeat reQuest to improve the reliability in the wireless communications. [Electronic resource] / International conference on computer science. – № 1. – P. 691–696. – 2015 – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/csci.2015.39>.
7. Chatei Y, Hammouti M, Ghadban A, Ar-reyouchi EM, Mekaoui S, Ghoumid K () Impact of message size on the average delay in narrowband wireless links. [Electronic resource] / Y. Chatei, M. Hammouti, A. Ghadban, K. Ghoumid // Lecture notes in electrical engineering. Springer. – № 519. – P. 217 – 229. 2019. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1405-6_8.
8. Chatei Y. Downlink and uplink message size impact on round trip time metric in multi-hop wireless mesh networks. [Electronic resource] / Y. Chatei, E. Ar-Reyouchi, K. Ghoumid // Int J Adv Comput Sci Appl IJACSA. – № 8(3). – P. 223 –229. – 2017. – Mode of access: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2017.080332>.
9. Ashjaei M. MTU assignment in a master-slave switched ethernet network. [Electronic resource] / M. Ashjaei, M. Behnam, L. Almeida, T. Nolte // Workshop on Real-Time Networks. 2013. Mode of access: https://www.es.mdu.se/pdf_publications/2943.pdf.
10. Pinals L. Link-state optimized decode-forward transmission for two-way relaying. [Electronic resource] / L.Pinals, M. Vu // Trans Commun. – № 4. – P. 1844 – 1860. – 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2530790>.
11. Shjaei M.A. MTU configuration for real-time switched Ethernet networks. [Electronic resource] / M.A. Shjaei, M.B. Behnam, L. Almeida, T.N. Nolte // J Syst Arch. – P. 15 – 25. – 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2016.04.009>.
12. Behnam M. Analysis and optimisation of the MTU in real-time communications over switched ethernet. [Electronic resource] / M. Behnam, R. Marau, P. Pedreiras // Emerging technologies and factory automation. – 2011. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/etfa.2011.6059021>.