

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/13>**Сайко В.Г.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Радзівілов Г.Д.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В.О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Наритник Т.М.Спільне підприємство «Інститут електроніки та зв'язку
Української академії наук національного прогресу»**Фисюк А.О.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Криволапов Я.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Криволапов Г.Я.

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка

МОДЕЛЬ РОЗРОБКИ ПРОМІЖНИХ ЛАНОК ГІБРИДНОЇ WI-FI ТА MESH-МЕРЕЖІ НА БАЗІ КАНАЛУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

У статті представлено модель розробки проміжних ланок гібридної Wi-Fi та Mesh-мережі спеціального призначення, що функціонують на основі каналів терагерцового (THz) діапазону в системах типу Fi-Wi. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням потреб у високошвидкісній та відмовостійкій інфраструктурі для забезпечення критичних застосувань, включаючи системи зв'язку для надзвичайних ситуацій, військові та спеціальні мережі. Використання THz-спектра відкриває перспективи створення каналів із надвисокою пропускнуою здатністю, мінімальними затримками та можливістю обслуговування великої кількості користувачів одночасно, що особливо важливо в умовах складних топологій та багатопроменевого поширення сигналів. Запропонована архітектура орієнтована на підвищення стійкості до збоїв, ефективність маршрутизації та гнучке управління ресурсами мережі. Особлива увага приділена проміжним ланкам Mesh-мережі, які забезпечують безперервність покриття, оптимальний розподіл навантаження, масштабованість та адаптивність до зміни топологій. У роботі розглядаються принципи інтеграції Fi-Wi технологій, що поєднують бездротовий доступ у користувацькому сегменті з волоконно-оптичними магістралями у транспортній підсистемі. Це дозволяє формувати гібридні системи зв'язку спеціального призначення, здатні витримувати високі вимоги до якості обслуговування та кіберзахисту. Наукова новизна полягає у визначенні структурної моделі проміжних ланок та розробці підходів до їх оптимізації з урахуванням специфіки THz-каналів, включаючи вплив атмосферних втрат, шумових факторів і просторових обмежень. Практична значущість полягає у можливості використання результатів для створення захищених, надійних та високопродуктивних Fi-Wi мереж, орієнтованих на сценарії з підвищеною відповідальністю, де критичними є стійкість, продуктивність і здатність до швидкого розгортання.

Ключові слова: Fi-Wi mesh-мережа, терагерцовий діапазон, проміжні ланки, THz-канал, спеціального призначення.

© Сайко В.Г., Радзівілов Г.Д., Комаров В.О., Наритник Т.М., Фисюк А.О.,
Криволапов Я.В., Криволапов Г.Я., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. Сучасний розвиток інформаційно-комунікаційних технологій зумовлює зростаючі вимоги до пропускної здатності, затримки та надійності безпроводових мереж. Перехід від класичних систем мобільного зв'язку до концепцій 5G/6G супроводжується активним впровадженням гібридних архітектур, які поєднують традиційні Wi-Fi-сегменти та динамічно самоорганізовані Mesh-мережі. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності таких мереж є використання частотного ресурсу терагерцового (ТГц) діапазону, що відкриває можливості для передачі даних на надвисоких швидкостях.

Терагерцовий діапазон забезпечує унікальні характеристики, серед яких – значна ширина смуги пропускання, потенціал підтримки масового доступу пристроїв Інтернету речей (IoT) та високоточне позиціонування. Водночас його застосування ускладнюється істотним впливом атмосферного поглинання, обмеженою дальністю дії та потребою у формуванні спрямованих променів для підтримання стійкого зв'язку. Це зумовлює необхідність розробки проміжних ланок та вузлів ретрансляції, які дозволяють оптимізувати топологію мережі, знижувати втрати сигналу й підвищувати енергетичну ефективність.

Особливого значення набуває побудова гібридних Wi-Fi та Mesh-мереж, де проміжні ланки виконують функції інтелектуальних ретрансляторів, що забезпечують баланс між швидкістю доступу та якістю обслуговування користувачів. Використання Mesh-архітектури дозволяє досягати високої гнучкості масштабування, резервування каналів і самовідновлення мережі при відмовах окремих вузлів. Застосування терагерцового каналу в такій архітектурі створює нові можливості для об'єднання локальних сегментів у єдину високошвидкісну систему.

Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених дослідженню Wi-Fi та Mesh-мереж, питання моделювання проміжних ланок на основі ТГц-каналу залишаються відкритими. Зокрема, недостатньо дослідженими є підходи до побудови математичних моделей, що враховують особливості поширення сигналів у міських умовах, вплив багатоприменовості та обмеження за енергоспоживанням. Це формує наукову й практичну актуальність представленого дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика створення Mesh-мереж нового покоління розглядається у численних роботах, присвячених підвищенню їх пропускної здатності, оптимізації топології та підвищенню надій-

ності. Дослідження останніх років зосереджені на можливостях використання міліметрового та терагерцового спектра для передачі даних, що дозволяє досягти швидкостей понад терабіт на секунду [1-28].

Серед актуальних напрямів досліджень виділяються:

- моделювання аква-атмосферних впливів на сигнал у ТГц-каналах;
- аналіз антенних рішень для спрямованої передачі у терагерцовому діапазоні;
- проектування архітектур бездротових мереж з використанням ТГц-лінків для високошвидкісного обміну даними;
- застосування ТГц-радіоліній для побудови mesh-мереж та інтеграції з волоконною інфраструктурою.

У працях [1-3] проаналізовано особливості поширення ТГц-сигналів, включно з поглинанням атмосферними газами, чутливістю до погодних умов та впливом багатоприменовості середовища. Відомі роботи [4-5] наголошують на потребі в оптимізації маршрутних протоколів для багаторівневих Mesh-мереж, оскільки традиційні алгоритми не враховують специфіку ТГц-каналів.

Окремі дослідження [6-8] стосуються інтеграції Fi-Wi систем, у яких оптичні магістралі поєднуються з бездротовими вузлами, що дає змогу створювати високопродуктивні гібридні архітектури. Значну увагу приділено питанням захищеності комунікацій у середовищах спеціального призначення [9-10], де критично важливими є безперервність зв'язку та стійкість до атак.

Узагальнення результатів цих робіт свідчить про актуальність подальших досліджень у напрямі створення моделей проміжних ланок Mesh-мереж, орієнтованих на ТГц-діапазон. Недостатньо вивченими залишаються аспекти практичної реалізації проміжних ланок у гібридних Fi-Wi архітектурах та методи підвищення їх стійкості й масштабованості. Саме цим питанням і присвячено дану роботу.

Мета статті полягає у розробці та обґрунтуванні моделі проміжних ланок Fi-Wi Mesh-мережі спеціального призначення на базі радіоканалів терагерцового діапазону, що забезпечують високошвидкісний обмін даними, масштабованість архітектури та підвищену стійкість до впливу зовнішніх факторів середовища.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі завдання:

1. Проаналізувати системну архітектуру Fi-Wi Mesh-мереж спеціального призначення з інтегра-

цією волоконно-оптичної та бездротової інфраструктури.

2. Розробити структурно-функціональну модель проміжних ланок на базі THz-каналу, яка включає геометричний, атмосферний, антенний, каналовий, шумовий та мережевий модулі.

3. Визначити основні параметри впливу атмосфери, спрямованості антен та умов поширення сигналу у терагерцовому діапазоні на ефективність зв'язку.

4. Сформувані узагальнені критерії оцінювання працездатності проміжних ланок Fi-Wi Mesh-мереж з урахуванням їх практичного застосування у системах спеціального призначення.

5. Обґрунтувати наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів у контексті подальшого розвитку високошвидкісних бездротових мереж шостого покоління та вище.

Виклад основного матеріалу дослідження. Системна архітектура гібридної Fi-Wi mesh мережі спеціального призначення

Мета розробки телекомунікаційної системи

Розробити та прототипувати масштабовану Fi-Wi mesh-мережу спеціального призначення з використанням опорної волоконної інфраструктури та бездротових магістральних/проміжних ланок у терагерцовому діапазоні для забезпечення високошвидкісного обміну даними між вузлами. Цілі:

- забезпечити високу пропускну здатність магістралей між PoP/агрегаторами;
- мінімізувати затримки для додатків реального часу (телеметрія, HD-відео, аварійні повідомлення);
- забезпечити масштабованість, стійкість та безпеку мережі;
- підготувати моделі та симуляції для подальшої адаптації.

Короткий опис архітектури

Ядро (backbone): оптоволоконна мережа (Fi – Fiber) з PoP (points of presence це "точка присутності" оператора зв'язку, яка є фізичним місцем розміщення його обладнання для підключення клієнтів до мережі.)/центрами обробки, що забезпечує стійку магістральну пропускну здатність.

Магістральні/проміжні бездротові ланки (Wi – Wireless): високопродуктивні THz-ланки виконують роль «волокон без кабелю» – з'єднують віддалені PoP або тимчасові вузли там, де прокладання волокна недоцільне.

Mesh-вузли (access/relay): локальні вузли (edge devices) реалізують mesh-маршрутизацію між собою для забезпечення локального покриття; кожен вузол має інтерфейси: оптика (за потреби),

THz RF фронтенд (для backhaul), традиційні Wi-Fi / 5G-like інтерфейси для кінцевих пристроїв.

Контроль/оркестрація: централізований/гібридний контролер (SDN-підхід) для управління маршрутизацією, плануванням ресурсів та політиками QoS.

Канали управління: надійні контрольні канали по волокну або низькочастотному радіо для обміну керуючими даними (зашифровані).

Fi-Wi ядро (оптоволоконна інфраструктура + високошвидкісний бездротовий доступ) використовується для центральних вузлів (штаби, командні центри, мобільні пересувні вузли зв'язку).

У польових умовах мобільні підрозділи створюють Mesh-мережу, яка підключається до найближчого Fi-Wi вузла або працює автономно у випадку втрати магістралі.

Компоненти системи (рівні)

PoP / Центр обробки: маршрутизатори класу carrier/edge, оптичні мультиплексори, енергонезалежні джерела живлення.

THz-Radio Frontend: високочутливі приймачі/передавачі з вузьконаправленою антенною системою, бек-офісний радіочастотний контролер; включає механізми управління променем (beam-steering) на рівні фізичного шару.

Mesh-вузол: процесор/FPGA/SoC для функцій routing, MAC, PHY abstraction; інтерфейси Ethernet/optical/Wi-Fi; засоби локального зберігання та енергопостачання.

SDN/NMS: контролер для політик, оптимізації завантаження, моніторингу.

Засоби безпеки: модулі (HSM) для зберігання ключів, протоколи аутентифікації й шифрування, журналювання.

Приклади використання

- Штаб підключений до Fi-Wi.
- На передовій військовослужбовці підрозділів формують Mesh через переносні радіостанції.
- БПЛА виступає тимчасовим Mesh-вузлом для обходу перешкод.
- Сенсори та дрони передають дані через Mesh → Fi-Wi → центр.
- Зв'язок штабу зберігається навіть при знищенні частини вузлів.

Таким чином, така mesh-мережа на основі Fi-Wi у мобільних сценаріях є адаптивною, самоорганізованою системою, яка поєднує переваги оптики (швидкість, надійність) та гнучкість бездротової багатохопової мережі. Це дуже хороше рішення для військових дій, кризових ситуацій та розгортання зв'язку з нуля.

Модель розробки проміжних ланків Mesh-мережі на базі THz-каналу для Fi-Wi систем спеціального призначення.

Узагальнена характеристика моделі

Mesh-мережі Fi-Wi (Fiber-Wireless) спеціального призначення забезпечують високу пропускну здатність, низьку затримку та надійне покриття для бойових дій. Для розширення мережі та покриття важкодоступних або мобільних вузлів доцільно використовувати проміжні (relay) ланки на базі THz-діапазону (0.1–100 THz), що дозволяє організувати високошвидкісний безпроводний зв'язок між вузлами.

Модель описує поведінку проміжних бездротових ланків у терагерцовому діапазоні, які виконують роль магістральних каналів у Fi-Wi mesh-мережах спеціального призначення. Основна мета – забезпечити надійну та високошвидкісну передачу даних між вузлами з урахуванням фізичних особливостей THz-діапазону та вимог масштабованості мережі. Модель враховує геометрію розташування вузлів, спрямованість антен, атмосферні ефекти, молекулярне поглинання, наведення променя та фейдингові характеристики каналу. Вона також передбачає мульти-хопні шляхи, резервування та механізми відновлення сигналу. Критерії оцінки включають пропускну здатність, SNR/SINR, ймовірність втрати пакета, затримку та енергоефективність. Практична реалізація передбачає калібрування моделей фейдингу в полі, використання адаптивних частотних вікон і моніторинг погодних умов для оптимальної маршрутизації та управління потужністю.

Архітектурна моделі проміжних ланків

Блок-схема архітектурної моделі наведено на рис. 1.

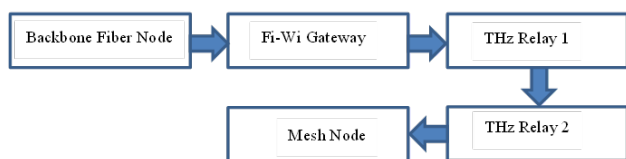


Рис. 1. Схема архітектурної моделі проміжних ланків

На схемі:

Fi-Wi Gateway: конвертує оптичний сигнал у THz і навпаки.

THz Relay: проміжна ланка, що здійснює ретрансляцію сигналу, може бути статичною або мобільною (наприклад, на БПЛА).

Mesh Node: кінцевий вузол мережі, який приймає або передає дані.

Backbone Fiber Node: магістральний оптичний вузол, який є "хребтом" телекомунікаційної

мережі, з'єднує локальні сегменти та забезпечує високошвидкісну маршрутизацію даних.

Запропонована схематична блок-схема для моделі THz Mesh-мережі показано на рис. 2.

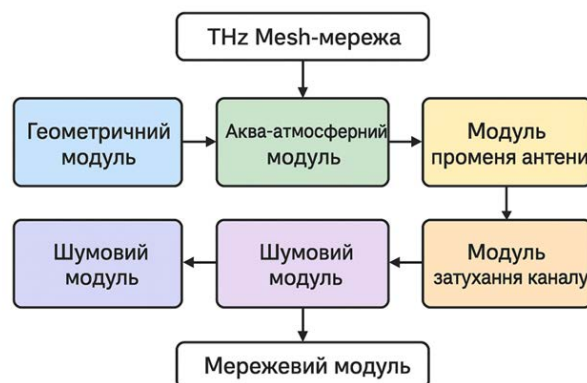


Рис. 2. Схематичний огляд/блок-схема для моделі THz Mesh-мережі

Модель описує передавально-приймальний ланцюг для THz Mesh-мережі з урахуванням геометрії вузлів, атмосферних/аква-атмосферних ефектів, характеристик променя антени, детального затухання каналу та шумових джерел. Мета – отримати реалістичні значення прийнятої потужності, SNR, ймовірностей відмови/виявлення і каналних показників (BER, capacity, outage) для різних сценаріїв (міські, прибережні, підводні/акваторні шляхи).

Модель складається з шести ключових модулів (геометрія, аква-атмосфера, антенний промінь, затухання каналу, шум, мережевий), які поєднуються за формулою прийнятої потужності P_r та шумової потужності N_0 для отримання SNR і подальших метрик (BER, capacity, outage). Для THz-діапазону критичними є молекулярне поглинання і похибка наведення вузьких антенних пучків – ці ефекти мають окремі параметричні моделі і вимагатимуть Monte-Carlo симуляцій для отримання статистично надійних результатів.

Структура, призначення та функції модулів наведено в табл. 1.

Модель каналу THz для проміжних ланків

Для THz-каналу необхідно враховувати:

Вільно-просторове поширення (FSPL) [21]:

$$PL_{FS}(d, f) = \left(\frac{4\pi f d}{c} \right)^2, \quad (1)$$

де d – дальність зв'язку.

Молекулярне поглинання [22, 23] (див. рис. 3):

$$PL_{mol}(d, f) = e^{\alpha(f)d}, \quad (2)$$

де $\alpha(f)$ – коефіцієнт поглинання водяною паром та іншими газами (H_2O , O_2).

Таблиця 1

Структура, призначення та функції модулів

Назва модуля	Призначення	Ключові параметри	Основні формули	Зауваження
1	2	3	4	5
Геометричний модуль	задає розташування вузлів Mesh (координати в 3D), траєкторії руху (якщо рухомі вузли), орієнтацію антен і відстані між вузлами.	Вхідні дані: координати вузлів (x_p, y_p, z_p), орієнтація (азимут, елев.), рух/швидкість, межі зони покриття. Вихід: відстань d , кут відхилення променя θ , відношення лінії бачення (LoS) / NLoS, геометричні затінення.		Обчислювати реальні кути нахилу для кожного TX–RX зв'язку, оскільки вузькоспрямовані THz-антени дуже чутливі до pointing error. Врахувати перешкоди (будівлі, рельєф) або задавати їх як ймовірністні карти покриття.
Атмосферний модуль	моделює вплив складу повітря/вологи, туману, опадів та (за необхідності) водяної поверхні/пари на поглинання й розсіювання в THz діапазоні.	частота f , концентрація водяної пари, температура T , тиск P , оптична щільність туману, параметри краплин (розмір, щільність).	– коефіцієнт молекулярного поглинання $k(f)$ (м/м) – залежить від спектральних ліній води й кисню; – поглинання на відстані d : $\alpha(f) = k(f)d$ – фактор затухання через поглинання: $e^{-\alpha(f)}$	Для THz діапазону молекулярне поглинання може домінувати; використовувати спектральні бази даних або параметризовані моделі (якщо доступно). Модуль повинен дозволяти задавати сценарії: «сухо», «волога», «туман», «дощ» – зі своїми $k(f)$.
Модуль променя антени	моделює діаграму направленості, коефіцієнти підсилення антени та похибки наведення (pointing errors).	Вхід: тип антени (лаборат., рупор, фазована решітка), апертура/розмір D , робоча частота f , кут нахилу/наведення, усереднена ширина пучка (HPBW).	– довжина хвилі $\lambda = \frac{c}{f}$ – ідеальний коефіцієнт підсилення (приблизно): $G \approx \eta(\pi/D\lambda)^2$ (де η – ефективність); – модель діаграми: $G(\theta, \phi) = G_{max} \cdot F(\theta, \phi)$ (де F – нормована – форма променя, наприклад Gaussian); фактор помилки наведення (pointing loss) $L_{point} = \exp(-(\theta_{err}/\theta_0)^2)$ або інша модель залежно від розподілу помилки.	Для фазованих решіток – врахувати бокові вівтарі (sidelobes) та дискретизацію фаз. Для вузьких пучків навіть мала помилка наведення суттєво знижує Pr.
Модуль затухання каналу	сумує всі вкладені механізми загасання: геометричне (розсіювання), молекулярне поглинання, поверхневе розсіювання, втрати через дощ/туман, мультипатчинг (якщо присутній).		$P_r(d, f) = P_t G_t(\theta_t) G_r(\theta_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot L_{point} \cdot e^{-k(f)d} \cdot L_{misc}$ де: – P_t – потужність передавача, – G_t, G_r – коефіцієнти підсилення передавача і приймача, – λ – довжина хвилі, – $k(f)$ – сумарний коефіцієнт поглинання (молекулярний + оптичний), – L_{misc} – додаткові втрати (розсіювання, поверхневі втрати і т. ін.), – L_{point} – фактор pointing error.	Розділяти $k(f)$ на частки: $k_{molecular}(f)$, $k_{raindrop}(f)$, $k_{fog}(f)$ – для прозорості моделі. Для NLoS шляхів включати експоненційне/поліноміальне додаткове затухання або статистичні моделі (лог-нормальне розсіювання).

1	2	3	4	5
Шумовий модуль	формує рівень шуму на вході приймача, враховує тепловий шум, молекулярний шум, шум від елементів фронту прийому (LNA), та інші фонові джерела.		$N_0 = K_B T_{sys} B$ де: K_B – постійна Больцмана (1.38×10^{-23} J/K), T_{sys} – еквівалентна системна температура (включає атмосферу та шум ЛНА), B – ширина смуги (Hz). SNR: $SNR = \frac{P}{N_0}$	– Для THz може бути суттєвий додатковий вклад від молекулярної емісії: включити $T_{atm}(f)$ як функцію частоти. – Якщо модель враховує квантові ефекти (дуже широкі смуги/високі частоти), перевірити припущення класичного теплового шуму.
Мережевий модуль	Мережевий модуль відповідає за організацію логічних зв'язків між вузлами Mesh-мережі, маршрутизацію даних, управління ресурсами та забезпечення QoS у багатохопових топологіях. Він інтегрує результати фізичного рівня (потужність, SNR, BER) у мережеві алгоритми для вибору оптимальних маршрутів і планування передачі.	Основні функції: Маршрутизація – вибір оптимального шляху між вузлами з урахуванням втрат у каналі, пропускної здатності та надійності. Розподіл ресурсів – керування смугою пропускання, динамічний вибір частот/каналів у THz-діапазоні. Управління трафіком – пріоритизація даних (службові, відео, сенсорні потоки). QoS та надійність – забезпечення мінімального рівня затримок і контроль імовірності відмови каналу. Самоорганізація Mesh – підтримка багатохоповості, балансування навантаження та резервування маршрутів. Інтеграція з Fi-Wi – забезпечує з'єднання між бездротовою THz-частиною та волоконно-оптичним сегментом.		Взаємодія з іншими модулями: – Отримує від канального модуля значення SNR та BER. – Використовує геометричний модуль для знання топології (координати вузлів). – Передає результати у вигляді таблиць маршрутів, карти пропускної здатності та QoS-параметрів для вищого рівня системи.

Загальні втрати каналу [24, 27]:

$$PL_{total}(d, f) = 10 \log_{10}(PL_{FS}) + \alpha(f)d \quad (3)$$

Функція SINR для проміжної ланки:

$$SINR = \frac{P_t G_t G_r}{PL_{total}(d, f) (N_0 B + I_{inter})}, \quad (4)$$

де:

P_t – потужність передавача.

G_t, G_r – коефіцієнти антен.

$N_0 B$ – шумова потужність.

I_{inter} – інтерференція від суміжних ліній.

Стратегія розробки проміжних ланків

Вибір частоти THz:

– 300 GHz, 600 GHz, 900 GHz – оптимальні для високої пропускної здатності на середні відстані (10–1000 м) (див. рис. 4).

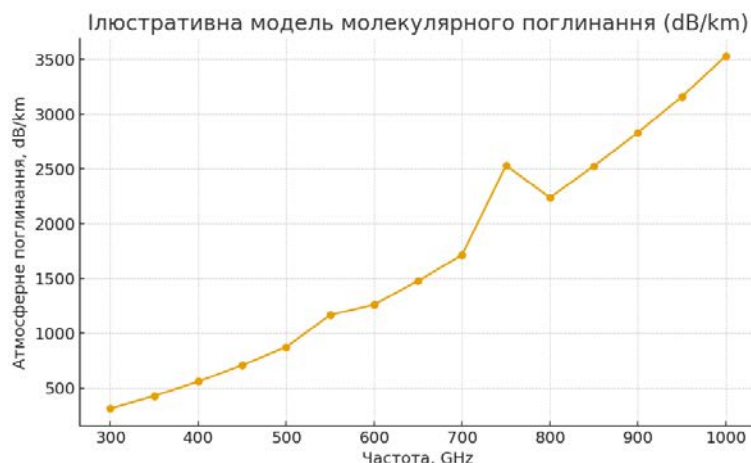


Рис. 3. Ілюстративна модель молекулярного поглинання

– Уникаємо сильних водяних резонансних смуг (HITRAN).

На рис. 4 наведено залежність пропускної здатності (throughput) від відстані для трьох робочих частот терагерцового діапазону (300, 600 та 900 ГГц) за умов відносної вологості повітря ($RH = 0\%$).

При відсутності вологості атмосферні втрати мінімальні, що дозволяє досягати високих швидкостей передачі даних на відстанях до 100–200 м.

Найкращі характеристики має частота 300 ГГц, яка забезпечує найбільшу пропускну здатність і найдовшу дальність роботи каналу.

Для частот 600 та 900 ГГц швидкість передачі значно зменшується вже після 50–100 м, що обмежує їх практичне застосування.

Визначення відстаней між вузлами [21, 28]:

Максимальна відстань d_{max} визначається обмеженням на SINR або BER:

$$d_{max} = \frac{1}{\alpha(f)} \ln \frac{P_t G_t G_r}{N_o B \text{SINR}_{min}} \quad (5)$$

Графік на рис. 5 показує залежність SINR від відстані у терагерцовому каналі

Як бачимо:

на коротких дистанціях (до ~200–300 м) SINR залишається високим;

після ~500 м відбувається різке падіння SINR через значні втрати;

понад 800–1000 м зв'язок практично неможливий без ретрансляції чи підсилення.

Вибір типу антен:

Напрявлені антенні решітки (URA) для зменшення інтерференції та підвищення SINR.

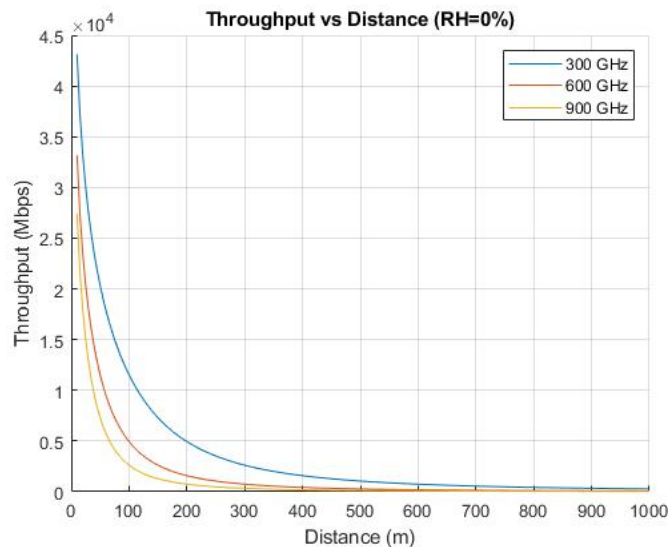


Рис. 4. Залежність пропускної здатності (throughput) від відстані

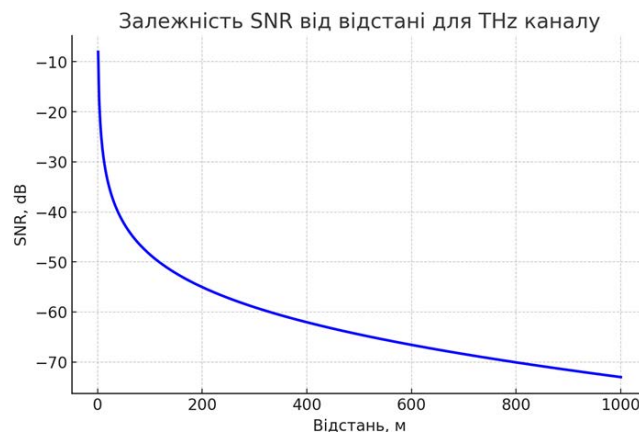


Рис. 5. Залежність SINR від відстані у терагерцовому каналі

Розміщення relay nodes:

Статичні: на дахах будівель, щоглах.

Мобільні: на БПЛА для динамічного покриття, адаптивного вибору маршруту.

Адаптивне керування маршрутом:

Використання алгоритмів QoS-aware mesh routing (наприклад, OLSR або AODV модифіковані під THz).

Можлива зміна частоти або проміжного вузла залежно від атмосферних умов.

Алгоритмічна модель (покроково)

Крок 1. Для кожного вузла мережі визначаємо потенційних проміжних relay nodes.

Крок 2. Розраховуємо $PL_{total}(d, f)$ для кожної можливої лінії.

Крок 3. Обираємо вузли, які забезпечують $SINR \geq SINR_{min}$.

Крок 4. Підраховуємо сумарний throughput через проміжні вузли.

Крок 5. Повторюємо для різних погодних умов (RH = 0%, 30%, 70%).

Математично [25,26]:

$$Throughput_{relay} = B \log_2(1 + SINR_{relay}) \quad (6)$$

Таким чином:

THz проміжні ланки дозволяють швидко розширення Mesh-мережі з високим throughput.

Врахування молекулярного поглинання

і атмосферних умов критично для точного планування відстаней між relay nodes.

Динамічне управління relay nodes (мобільні БПЛА) покращує надійність і адаптивність бойової Fi-Wi мережі.

Особливості та наукова новизна роботи**Особливості роботи**

У статті представлено системну архітектуру Fi-Wi mesh-мережі спеціального призначення, яка інтегрує волоконну опорну інфраструктуру та проміжні терагерцові (THz) ланки. Запропоновано узагальнену модель проміжних ланок у THz-діапазоні, що враховує вплив середовища, геометрію мережі та антенні характеристики. Структуровано функціональні модулі моделі: геометричний, аква-атмосферний, антенний, каналовий, шумовий та мережевий. Особливу увагу приділено забезпеченню високошвидкісного та надійного обміну даними між вузлами в умовах спеціальних застосувань.

Наукова новизна

– Уперше для Fi-Wi mesh-мереж спеціального призначення обґрунтовано використання проміжних THz-лінків як ключового елемента масштабованої архітектури.

– Запропоновано модульний підхід до побудови моделі проміжних ланок, який дозволяє системно враховувати багатофакторний вплив середовища, антенних систем та каналів зв'язку.

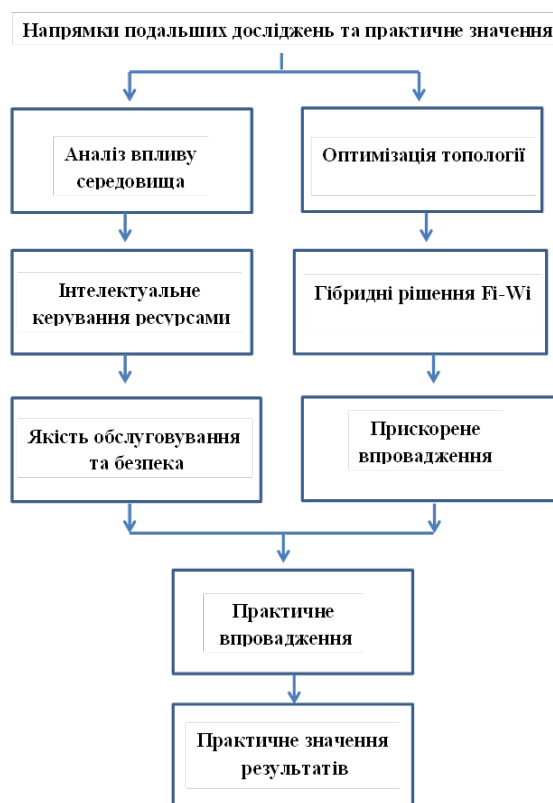


Рис. 6. Напрямки подальших досліджень

– Сформовано концепцію інтеграції мережевого модуля, що поєднує фізичний рівень із логікою управління потоками даних у спеціалізованих мережах.

– Створено теоретичне підґрунтя для подальшої оптимізації параметрів THz-радіоліній із метою підвищення пропускної здатності та стійкості до завад.

Напрямки подальших досліджень та практичне значення

Перспективи розвитку Fi-Wi Mesh-мереж на базі каналів терагерцового діапазону безпосередньо пов'язані з удосконаленням архітектурних рішень і підвищенням надійності функціонування систем у реальних умовах. Подальші дослідження доцільно зосередити на таких напрямках (див. рис. 6):

1. Аналіз впливу середовища. Поглиблене моделювання впливу атмосферних явищ (дощу, туману, пилу, вологості) та багатопроточності на параметри THz-каналів.

2. Оптимізація топології. Адаптивний вибір кількості й розташування проміжних вузлів з використанням алгоритмів глобальної оптимізації.

3. Інтелектуальне керування ресурсами. Створення алгоритмів динамічного розподілу спектра та когнітивних методів прогнозування стану каналу.

4. Гібридні рішення Fi-Wi. Поєднання оптичних та бездротових сегментів у проміжних ланках і забезпечення швидкого відновлення зв'язності при відмовах.

5. Якість обслуговування та безпека. Формування QoS-моделей і впровадження захищеної маршрутизації та шифрування даних у THz-каналах.

6. Практичне впровадження. Створення прототипів проміжних вузлів, проведення експери-

ментальних вимірювань і порівняння їх з теоретичними моделями.

Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі для проектування високошвидкісних телекомунікаційних систем спеціального призначення. Вона дозволяє оптимізувати структуру мережі, зменшити затримки, підвищити стійкість до завад і гарантувати заданий рівень QoS. Отримані результати можуть стати основою для створення прототипів апаратних рішень, розробки когнітивних алгоритмів керування ресурсами та впровадження на практиці надійних Fi-Wi систем нового покоління.

Висновки

1. Запропоновано системну архітектуру Fi-Wi mesh-мережі спеціального призначення, що поєднує волоконну опорну інфраструктуру з проміжними терагерцовими лінками для забезпечення високошвидкісного та надійного обміну даними.

2. Розроблено модульну модель проміжних ланок у THz-діапазоні, яка враховує геометричні, атмосферні, антенні, каналові, шумові та мережеві фактори, що забезпечує комплексний підхід до оцінки якості зв'язку.

3. Наукова новизна полягає у застосуванні проміжних THz-лінк як основи масштабованої архітектури та в інтеграції мережевого модуля для поєднання фізичного рівня з управлінням потоками даних.

4. Практична цінність роботи визначається можливістю використання отриманих результатів при проектуванні, оптимізації та моделюванні спеціалізованих Fi-Wi mesh-мереж у терагерцовому діапазоні.

Список літератури:

1. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, vol. 10, no. 10, pp. 3211–3221.
2. Nagatsuma T., Ducournau G., Renaud C.C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics. *Nature Photonics*, 2016, vol. 10, no. 6, pp. 371–379.
3. Han C., Wu J., Rangan S., Wang Z., Rappaport T.S. Terahertz wireless channels: A holistic survey on measurement, modeling, and analysis. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 834–887.
4. Akyildiz I.F., Kak A., Nie S. 6G and beyond: The future of wireless communications systems. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 133995–134030.
5. Chowdhury M.Z., Hasan M.K., Shahjalal M., Jang Y.M. 6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, vol. 1, pp. 957–975.
6. Vardakas J.S., Zorba N., Verikoukis C.V. A survey on QoE-oriented wireless resources management. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, vol. 16, no. 1, pp. 123–145.
7. Maier M., Chowdhury M., Rimal B.P., van Heddeghem W. The tactile internet: Vision, recent progress, and open challenges. *IEEE Communications Magazine*, 2016, vol. 54, no. 5, pp. 138–145.
8. Khalid Z., Iqbal A., Malik A.N., Qaraqe K. Fi-Wi access networks: A survey on integration challenges, solutions, and future research directions. *Computer Networks*, 2019, vol. 149, pp. 246–262.
9. Zhang Y., Chen X., Letaief K.B. Security and privacy for 6G: A survey on research directions and challenges. *IEEE Wireless Communications*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 136–143.
10. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376.

11. Сайко В. Г., Наритник Т. М. Безпроводові системи зв'язку терагерцового діапазону : монографія. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2019. 68 с.
12. Сайко В. Г., Одарченко Р. С., Абакумова А. О., Наритник Т. М., Наконечний В. С., Домрачев В. М., Толюпа С. В., Заблоцький В. Ю., Баховський П. Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G : монографія. Київ : ТОВ «ІПро формат», 2021. 200 с.
13. Avdeenko G., Narytnik T., Korsun V., Saiko V. Simulation of a terahertz band wireless telecommunication system based on the use of IR-UWB signals. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78, No. 10. P. 901–919.
14. Pavlov O. I., Guseva O., Yashchyshyn Y., Saiko V., Avdeyenko G. L. Mathematical Modeling of FMCW Radar: Signal at Receiver Input. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2024. Vol. 66, No. 12. P. 648–657. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202223181>
15. Saiko V., Odarchenko R., Zhurakovskiy B., Yevdokymenko M., Fesenko V., Tkachova O. A Model for Building a Wireless Terahertz Network for 5G NR. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). 2023. P. 1071–1076.
16. Сайко В. Г., Романов Д. О., Наритник Т. М., Комаров В. О., Фомін М. М. Аналіз перспектив використання терагерцового діапазону частот для безпроводових мереж зв'язку спеціального призначення. *Збірник наукових праць ВІПТ : системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2024. Вип. 5. С. 138.
17. Лукова-Чуйко Н. В., Толюпа С. В., Наконечний В. С., Сайко В. Г., Наритник Т. М., Домрачев В. М. Метод підвищення ефективності управління енергетичним потенціалом захищених радіоліній терагерцового діапазону з використанням штучного інтелекту. *Безпека інформаційних систем і технологій*. 2021. № 2. С. 38–43.
18. Saiko V., Narytnyk T. High-reliability 5G/IoT mobile communication method when using the terahertz wavelength range. Theoretical and scientific foundations in research in Engineering : collective monograph / Ed. by Saiko V., Narytnyk T. Boston : Primedia eLaunch, International Science Group, 2022. P. 477–497. DOI: 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/>
19. Сайко В. Г., Наритник Т. М., Баховський П. Ф. Модель підвищення показників якості обслуговування гетерогенної мережної інфраструктури терагерцового діапазону. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : технічні науки*. 2023. Т. 34 (73), № 1. С. 51–55.
20. Narytnik T., Saiko V., Bilous O., Fisun A. Energy calculation of the terahertz radio link. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78, No. 6. P. 537–557.
21. Friis H. T. *A Note on a Simple Transmission Formula*, Proceedings of the IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, 1946.
22. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C., Kochanov R. et al., *The HITRAN2020 molecular spectroscopic database*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, vol. 277, 107949, 2022.
23. ITU-R Recommendation P.676-12, *Attenuation by atmospheric gases*, International Telecommunication Union, Geneva, 2019.
24. Jornet J. M., Akyildiz I. F. *Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band*, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 10, no. 10, pp. 3211–3221, 2011.
25. Kokkonen J., Lehtomäki J., Juntti M. *A discussion on molecular absorption noise in the terahertz band*, Nano Communication Networks, vol. 8, pp. 35–45, 2016.
26. Papasotiriou E. N., Foudas I. K., Molisch A. F. *An experimentally validated fading model for terahertz wireless systems*, Scientific Reports, vol. 11, 20456, 2021.
27. Taleb F., Pinheiro M. J., D. B. da Costa et al. *Propagation of THz radiation in air over a broad range of frequencies and conditions*, Frontiers in Physics, vol. 11, 1224226, 2023.
28. Pozar D. M. *Microwave Engineering*, 4th ed., Wiley, 2012. (Для довідкових розрахунків антен, шуму та базових енергетичних формул, включаючи kTB).

Saiko V.G., Radzivilov G.D., Komarov V.O., Narytnyk T. M., Fysiuk A.O., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya. MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF INTERMEDIATE LINKS IN HYBRID WI-FI AND MESH NETWORKS BASED ON THE TERAHERTZ BAND CHANNEL

The article presents a comprehensive model for the development of intermediate links in hybrid Wi-Fi and Mesh networks designed for mission-oriented applications, based on terahertz (THz) band channels within Fi-Wi systems. The relevance of this study stems from the rapidly growing demand for high-speed, fault-tolerant, and secure communication infrastructures that can support critical scenarios, including emergency response, military networks, and special-purpose communication systems. The adoption of the THz spectrum is justified by its unique capability to deliver ultra-high capacity, extremely low latency, and support for massive user density in complex topologies affected by multipath signal propagation. The proposed network architecture is focused on enhancing fault tolerance, improving routing efficiency, and enabling flexible resource allocation in dynamically changing environments. Particular emphasis is placed on intermediate Mesh links that provide continuous coverage, optimal load balancing, scalability, and adaptability to topological changes. The integration of Fi-Wi technologies, which combine wireless access in the user segment with fiber-optic backbones in the transport infrastructure, is explored as a key element for achieving hybrid mission-specific communication systems. Scientific novelty lies in the definition of a structural model for intermediate links and the substantiation of optimization principles that account for the peculiarities of THz channels, including atmospheric attenuation, noise impact, and spatial limitations. The practical value of the study is expressed through the applicability of the obtained results for designing secure, reliable, and high-performance Fi-Wi networks, particularly relevant for high-responsibility scenarios where resilience, efficiency, and rapid deployment are essential.

Key words: Fi-Wi mesh network, terahertz band, intermediate links, THz channel, mission-oriented.

Дата надходження статті: 24.09.2025

Дата прийняття статті: 13.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025