

УДК 004.624

DOI <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2025-01-09-03>

СУЧАСНИЙ СТАН ТЕРАГЕРЦОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РОЗПОДІЛЕНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

Охременко Є. О., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0009-0000-4907-6477>, ohremenko2003@gmail.com

Наритник Т. М., к.т.н., академік Української академії наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0009-0008-3152-4356>, t.natytnyk@ukr.net

Капштик С. В., к.т.н., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-3509-8015>, sergii.kapshtyk@gmail.com

Авдєєнко Г. Л., к.т.н., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-4788-7273>, django2006@ukr.net

Анотація. Стаття пропонує ґрунтовний огляд апаратних та алгоритмічних рішень для побудови високошвидкісних безпроводових систем у терагерцовому (ТГц) діапазоні, призначених для мереж шостого покоління (6G) і розподілених низькоорбітальних супутникових угруповань. Актуальність тематики зумовлена стрімким зростанням кількості IoT-пристроїв і потребою в глобальному обміні даними із затримкою < 1 мс і швидкістю > 100 Гбіт/с. Аналіз літератури й експериментальних прототипів показує, що поєднання масивних MIMO, гібридного формування променів і каналів 100–300 ГГц забезпечує спектральну ефективність до 20 біт/с/Гц при помірній кількості RF-ланцюгів. Лабораторні радіорелейні лінки 130–134 ГГц уже демонструють швидкість 1 200 Мбіт/с на відстані 1 км при $BER \leq 10^{-6}$, що підтверджує життєздатність ТГц-інтерфейсів для міських і космічних сценаріїв. Особливу увагу приділено концепції «розподіленого супутника», де інтегруються туманні обчислення й міжсупутникові лінії зв'язку 5G-NTN і NB-IoT, що дає змогу локально обробляти телеметрію та зменшувати навантаження на наземний сегмент.

Оглянуті матеріали свідчать, що перехід до монолітних GaN-RFIC з убудованими фазообертачами підвищує енергетичний бюджет на 30%, а композитні графенові тепловідводи знижують пікову температуру мікросхем на 15 °С. Водночас залишаються відкритими питання калібрування антенних масивів у вакуумі, пом'якшення фазового шуму вище за 200 ГГц і гармонізації розподілу спектра між активними й пасивними службами. Запропонована дорожня карта включає орбітальні експерименти з групою CubeSat, розроблення самонавчальних алгоритмів керування променями та створення адаптивних FEC-кодів, стійких до доплерівських зсувів. Таким чином, робота формує цілісне бачення переходу від лабораторних стендів до повномасштабних ТГц-мереж, здатних стати ядром 6G-екосистеми й глобального інтернету речей.

Ключові слова: терагерцовий діапазон; 6G; розподілений супутник; гібридне формування променів; MIMO; міжсупутникові лінії зв'язку.

PROSPECTS OF TERAHERTZ TECHNOLOGIES FOR DISTRIBUTED SATELLITE SYSTEMS

Yehor Okhremenko, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0009-0000-4907-6477>, ohremenko2003@gmail.com

Teodor Narytnyk, PhD (Tech.), Academician of the Ukrainian Academy of Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0009-0008-3152-4356>, t.natytnyk@ukr.net

Serhii Kapshtyk, PhD (Tech.), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-3509-8015>, sergii.kapshtyk@gmail.com

Hlib Avdiienko, PhD (Tech.), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-4788-7273>, django2006@ukr.net

Abstract. The paper presents a comprehensive survey of hardware and algorithmic solutions for building high-speed wireless systems in the terahertz (THz) band that target sixth-generation (6G) networks and distributed low-Earth-orbit satellite constellations. The topic is driven by the rapid growth of IoT devices

and the need for global data exchange with latency < 1 ms and throughput > 100 Gb/s. A review of the literature and experimental prototypes shows that the combination of massive-MIMO, hybrid beamforming and 100–300 GHz channels can yield spectral efficiencies up to 20 bit/s/Hz while keeping the number of RF chains moderate. Laboratory radio-relay links at 130–134 GHz already deliver 1.2 Gb/s over 1 km with $BER \leq 10^{-6}$, proving the viability of THz interfaces for both urban and space scenarios. Special emphasis is placed on the “distributed satellite” concept, which integrates fog computing and inter-satellite links based on 5G-NTN and NB-IoT, allowing local telemetry processing and easing the load on the ground segment.

The surveyed materials indicate that the transition to monolithic GaN RFICs with built-in phase-shifters can raise the energy budget by 30%, while composite graphene heat spreaders reduce peak chip temperatures by 15 °C. Outstanding challenges remain, including vacuum calibration of antenna arrays, mitigation of phase noise above 200 GHz, and spectrum-sharing coordination between active and passive services. The proposed roadmap covers orbital experiments with a CubeSat cluster, the development of self-learning beam-control algorithms, and the creation of adaptive FEC codes resilient to Doppler shifts. Thus, the study offers a holistic vision for moving from laboratory testbeds to full-scale THz networks capable of becoming the backbone of the 6G ecosystem and the global Internet of Things.

Key words: terahertz band; 6G; distributed satellite; hybrid beamforming; MIMO; inter-satellite links.

Вступ

Нестримне збільшення медіаресурсів створює нові виклики для технологій передачі даних. Створення й упровадження нових технологій, а також збільшення інформації, що потрібно передати, призводить до безпрецедентного зростання кількості взаємозалежних пристроїв, що, у свою чергу, потребує збільшення швидкості передачі даних і нових технологій для задоволення все більших потреб у зв'язку, обміні даними, навігації та інших сферах. У відповідь на цю проблему розглядається можливість використання інших частотних діапазонів у радіочастотному спектрі, що передбачає не лише покращення наявних технологій, а й розширення діапазонів частот, які раніше не використовувалися.

Виконання досліджень

Одним із таких є ТГЧ-діапазон (терагерцовий діапазон частот). Згідно з рекомендаціями Міжнародного союзу електрозв'язку (Регламент радіозв'язку 5 стаття), ТГЧ-діапазон займає частоти від 300 ГГц до 3 ТГц (рис. 1). Проте в найбільш широкій інтерпретації цей діапазон займає ділянку частот від 100 ГГц до 3 ТГц [1]. Терагерцовий діапазон частот дає унікальні можливості для безпроводових систем зв'язку (відносно мала дальність, низька завантаженість зв'язку) завдяки широкій смузі пропускання, що забезпечує передачу даних зі швидкістю, недосяжною для нижчих частотних діапазонів [2].

Створено цифрові радіорелейні системи з пропускною здатністю до 1200 Мбіт/с у діапазоні частот 130–134 ГГц. Розроблені лабораторні зразки включають малогабаритні елементи, такі як смугові фільтри й рупорні антени з ліновими концентраторами [2].

Проведені випробування підтвердили ефективність зв'язку в ТГц діапазоні на відстанях до 1 км за умови низького рівня помилок ($BER \leq 10^{-6}$). Дослідження показали стабільність передачі сигналів при використанні сучасних схем модуляції, таких як КАМ-64. Ці результати свідчать про перспективність застосування ТГц технологій у складних середовищах, таких як міські або промислові зони [2].

Програма 6Genesis Flagship, яка займається розробкою технологій для мобільних мереж шостого покоління (6G), передбачає значний прорив у частотних діапазонах, швидкості передачі даних та ефективності використання ресурсів мережі. Використання терагерцового діапазону (ТГц) розглядається як один із ключових напрямів 6G, що дасть можливість забезпечити надвисоку пропускну здатність мережі радіодоступу, перехід до мікро- та пікасот, малу затримку й високу надійність для різноманітних сценаріїв надання послуг, включаючи розширений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB), масовий зв'язок машинного типу (mMTC) і високонадійні комунікації з малою затримкою (uRLLC). Упровадження цих технологій створить фундамент для інтеграції інтелектуальних систем, що функціонують у різних середовищах, таких як повітряний простір, космос, наземні мережі й навіть підводні комунікації [3].

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) є основою для 5G і 6G мереж, підвищуючи пропускну здатність і надійність завдяки одночасній передачі кількох потоків даних. У субтерагерцовому діапазоні (100 ГГц–1 ТГц) MIMO дає змогу досягати швидкостей понад 100 Гбіт/с. Наприклад, 2×2 MIMO-система на частотах 142 ГГц і 285 ГГц з модуляцією 16-QAM забезпечила пропускну здатність 126 Гбіт/с на канал шириною 12,5 ГГц [12].

Реалізація MIMO:

5G – у сантиметровому (3–30 ГГц) і міліметровому (30–300 ГГц) діапазонах масивні антенні решітки (massive MIMO) компенсують втрати сигналу. Наприклад, базові станції 5G у міських районах використовують 64×64 MIMO для одночасного обслуговування десятків користувачів.

6G – очікується інтеграція ТГц-частот із сотнями антенних елементів для просторового мультиплексування, що підтримує сценарії типу голографічного зв'язку чи масового IoT.

Особливе значення в розробці 6G надається системам передачі даних у терагерцовому діапазоні, які вимагають оптимізації апаратних засобів і створення нових матеріалів. Учасники програми

6Genesis працюють над створенням ефективних антен із великим діапазоном частот, використовуючи наноматеріали та тривимірний друк. Це дасть змогу розробляти енергоефективні системи з високою продуктивністю, які будуть здатні працювати в умовах високої щільності пристроїв і передачі великих обсягів даних у космічних і наземних системах [3].

Основними перевагами й перспективами розвитку терагерцового діапазону частот для систем зв'язку є перехід до цього діапазону, який здатен суттєво підвищити пропускну здатність мереж, що є критично важливим для державних, військових і спеціалізованих систем зв'язку. Однак реалізація цього потенціалу вимагає створення високоефективних засобів генерації, оброблення та випромінювання сигналів у ТГц діапазоні частот.

Використання субтерагерцевих частот у системах MIMO є важливим складником технології 5G, що дає змогу підвищити пропускну здатність та енергоефективність завдяки використанню великої кількості незалежних керованих променів для одночасної передачі кількох потоків даних до різних абонентів. У системі стандартів 5G передбачається освоєння нових, більш високих частотних діапазонів, для збільшення пропускну здатності мережі й покращення послуг, що надаються. У цьому напрямі перспективним вважається освоєння субтерагерцевих частот (від 100 ГГц до 1 ТГц) у технологіях 5G, 6G технологіях, для досягання швидкостей передачі даних більше ніж 100 Гбіт/с. На цей час уже реалізовано 2×2 MIMO-систему, що працює на частотах 142 ГГц і 285 ГГц. Створена система показала спроможність забезпечити пропускну здатність для 126 Гбіт/с для 16-QAM модуляції при використанні 12,5 ГГц смуги пропускання для кожного каналу [12].

Важливим елементом технології MIMO є метод формування незалежних спрямованих променів і їх орієнтації по визначеному напрямку. Для цього можуть застосовуватися цифрові й аналогові технології фазованих антенних решіток. Аналогова технологія передбачає використання фазообертачів або ліній затримок зі змінною затримкою для формування приймального та передавального променів у визначеному напрямку. Цифрова технологія здійснює операції формування променів цифровим методом, наприклад, використовуючи алгоритм оберненого двомірного цифрового перетворення Фур'є.

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) є ключовою для систем 5G, особливо в сантиметровому (cmWave, 3-30 ГГц) та міліметровому (mmWave, 30-300 ГГц) діапазонах, де великомасштабні антенні решітки дають змогу компенсувати втрати на шляху поширення сигналу [13]. Для реалізації MIMO у 5G використовуються різні архітектури, кожна з яких має свої переваги й обмеження.

Архітектура базової смуги: кожен антенний порт керується окремим трансивером, що забезпечує високу гнучкість у формуванні променів, але потребує значних енергетичних витрат і складного апаратного забезпечення.

RF-орієнтована архітектура: формування променів відбувається на радіочастотному рівні, зменшуючи кількість трансиверів та енергоспоживання, але з обмеженою гнучкістю.

Гібридна архітектура: комбінує RF і базову смугу, оптимізуючи ресурси й забезпечуючи високу пропускну здатність.

Методи формування променів включають сітку променів (Grid-of-Beams), нульове примушення (Zero-Forcing), методи на основі кодових книг і формування власного променя (Eigen-Beamforming), кожен із яких адаптований до конкретних умов експлуатації [13].

Гібридне формування променів (Hybrid Beamforming, HBF) оптимізує використання антенних масивів, комбінуючи аналогові та цифрові методи. У mmWave massive MIMO HBF зменшує кількість RF-ланок, використовуючи фазообертачі й перемикачі. Дослідження в Університеті Ліможа показали, що архітектура PFC (Partially/Fully Connected) із дробовим програмуванням досягає спектральної ефективності до 20 біт/с/Гц [15]. Наприклад, HBF застосовується в 5G-станціях для спрямованого зв'язку з рухомими об'єктами, такими як автомобілі чи дрони, зберігаючи енергоефективність.

Проблеми включають складність калібрування антен і потребу в адаптації до динамічних умов. У ТГц-діапазоні гібридна технологія долає обмеження аналогових методів, розбиваючи антени на групи з апаратно заданими фазовими зсувами, що спрощує управління променями [15].

Терагерцовий діапазон частот охоплює частоти від 100 ГГц і вище. Довжина хвилі в цьому діапазоні становить 3мм і менше. Такі показники суттєво ускладнюють використання як аналогових методів на базі керованих фазообертачів, так і цифрових методів. Перспективним напрямом для цього діапазону вважається використання гібридної технології формування променів. У цій технології формування променів здійснюється у 2 етапи. Опромінювачі фазованої антенної решітки розбиті на групи, для яких апаратно визначені фазові зсуви. Цифрова частина формує розподіл фаз сигналів, що передаються/приймаються на ці групи, з метою управління сформованим променем у просторі.

Спрямування сигналів з антен у потрібному напрямку використовують технології формування променів. Виділимо кілька основних: вузькосмугове (Narrowband Beamforming) застосовується в системах із малим частотним діапазоном, але неефективне для високошвидкісних мереж. Широкопasmового (Wideband Beamforming), у свою чергу, – для мереж із надширокопasmовими системами з дуже великим пропусканням, що є дуже корисним у нашому випадку. Фіксоване формування використовується в ситуаціях, де середовище є стабільним, проте його ефективність значно погіршується в змінних умовах [9].

Використання просторово-часового кодування OSTBC (Orthogonal Space-Time Block Coding) дасть змогу ефективно передавати дані через кілька антен із забезпеченням стійкості до перешкод і шумів. Для динамічних умов, у нашому випадку для забезпечення стійкості сигналу в умовах руху, краще використовувати адаптивне кодування в каналі [11].

Дуже велике значення приділяється компонентам, які використовуються в обладнанні. Одними з таких є підсилювачі потужності на основі GaN, зокрема QPB3810, що включає інтегрований контролер біасу для оптимальних точок налаштування, забезпечує середню потужність 8 Вт у діапазоні 3,4–3,8 ГГц. Це дає змогу значно зменшити розміри порівняно з традиційними рішеннями на окремих компонентах QPB9380. Інтегрований модуль для малих клітин BTS, що підтримує потужність до 20 Вт, використовується для TDD і mMIMO систем. Він об'єднує два етапи підсилення й вимикач для підтримки високої потужності в компактному розмірі. Завдяки GaN підсилювачам можна досягати високого ККД, отримуючи перевагу ще й у розмірах порівняно з традиційними рішеннями, що особливо важливо для застосувань у 5G та супутникових системах, де розмір і вага є критично важливими показниками [10].

У цьому напрямі особливе місце посідають програми Агентства перспективних оборонних дослідницьких проєктів (DARPA). Наприклад, програма SWIFT (Sub-millimeter Wave Imaging Focal Plane Technology) спрямована на розвиток технологій субміліметрової візуалізації для фокальних площин, а програма TFAST (Technology for Frequency Agile Digitally Synthesized Transmitters) зосереджена на створенні частотно-агільних цифрових синтезованих передавачів. Не менш важливі розробки в рамках програми Terahertz Electronics, яка займається створенням високошвидкісних малопотужних транзисторів. Варто також згадати програму NEXT, що працює над створенням транзисторів на основі напівпровідникових нітридів. Ці інновації є ключовими для впровадження ТГц технологій у системи зв'язку майбутнього [4].

ТГц технології відкривають нові горизонти для транспортних мереж мобільного зв'язку. Радіорелейні системи в цьому діапазоні забезпечують передачу великих обсягів даних, таких як відеопотоки чи графічні дані, зі швидкістю понад 1 Гбіт/с. Такі системи використовуються для створення компактних і захищених мереж, що дає змогу суттєво підвищити ефективність інфраструктури мобільного зв'язку нового покоління [2].

Інновації в галузі супутникових технологій сприятимуть подальшому розвитку тенденцій у передаванні й обробці інформації. Якщо супутники матимуть розширений функціонал і можливість працювати на вищих частотах, це забезпечить покращену якість передачі даних на великій швидкості та стане важливим кроком до розв'язання сучасних потреб у високошвидкісному інтернеті й розширенні можливостей глобальної мережі зв'язку. Корисне навантаження супутників перспективних систем є багатфункціональним. Його робота потребує передавання та прийому великих обсягів інформації, що, у свою чергу, передбачає наявність широкошвидкісних високошвидкісних каналів.

Для вирішення завдань швидкої передачі трафіку й зменшення часу реакції пропонується концепція «розподіленого супутника», що адаптована під вимоги інтернету речей. Вона передбачає використання кількох супутників малого класу, які спільно виконують функції одного великого супутника. Приклади проєктів:

Starlink – тисячі низькоорбітальних супутників для широкошвидкісного інтернету зі швидкістю до 300 Мбіт/с.

OneWeb – мережа для зв'язку у віддалених регіонах із затримкою 20–30 мс.

IoT-застосування – ретрансляція даних від сенсорів у реальному часі, наприклад, для моніторингу клімату чи логістики.

Низькоорбітальні системи (500–1100 км) забезпечують затримки 1,67–5,2 мс, а інтеграція туманних обчислень дає змогу обробляти дані на орбіті, зменшуючи навантаження на наземні канали [14]. Координація між супутниками здійснюється через GPS і міжсупутникові зв'язки (ISL) з алгоритмами типу «Leader-Follower». Сенсори SAW забезпечують компактність та енергоефективність, а протоколи LoRaWAN і NB-IoT адаптуються до космічних умов.

Такий підхід дає змогу зменшити масу й енергоспоживання супутників, а також скоротити затримки передачі даних. У такій системі група супутників може виконувати функціональні завдання, а також забезпечувати локальні обчислення, що відповідає концепції туманних обчислень, наближаючи обчислювальні потужності до джерел інформації в космосі.

Використання мікро- й наносупутників (зокрема кубсатів) для створення розподіленої архітектури є інноваційним підходом у сучасній космонавтиці. Розподіл функціональних блоків корисного навантаження між кількома супутниками дає можливість оптимізувати їхні ресурси, знизити витрати на виробництво та запуск, а також забезпечити гнучкість у виконанні завдань. Така структура сприяє створенню більш стійких та адаптивних систем [5].

Архітектура розподіленого супутника базується на принципі розподілу функціональних завдань між кількома малими космічними апаратами, такими як мікросупутники й кубсати, що працюють як єдина система. Основна ідея полягає в тому, щоб використовувати легші та менш дорогі апарати замість одного великого супутника. Ця концепція дає змогу збільшити гнучкість системи й забезпечити

виконання складних завдань, таких як зондування Землі, забезпечення телекомунікацій і підтримка інтернету речей (IoT).

Низькоорбітальні супутникові системи для IoT пропонують глобальне покриття завдяки групі наносупутників, які виконують функції ретрансляції, обчислень і маршрутизації. Концепція «розподіленого супутника» інтегрує «туманні» та «граничні» обчислення, даючи змогу обробляти дані IoT у реальному часі безпосередньо на орбіті, зменшуючи затримки й навантаження на канали зв'язку. Затримки передачі даних для орбіт 500–1100 км становлять 1,67–5,2 мс [14].

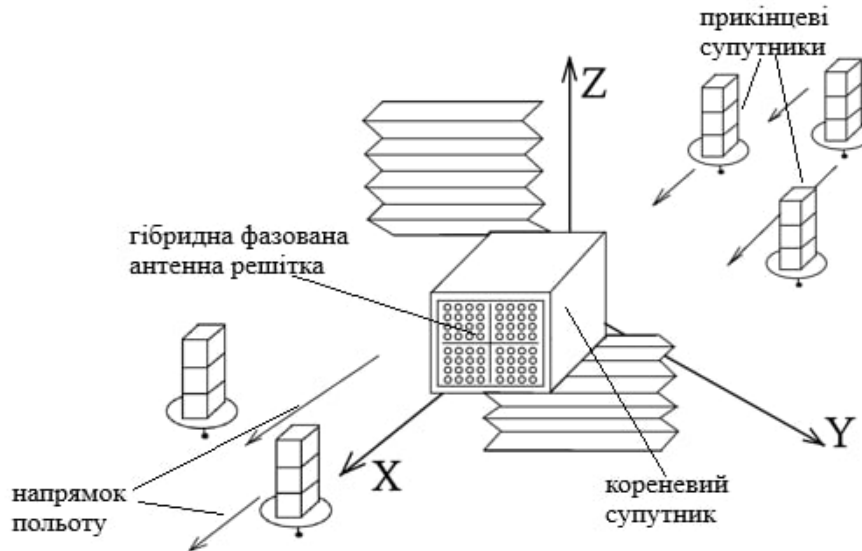


Рис. 1. Архітектура розподіленого супутника

Використовується архітектура двох типів: централізована й децентралізована. Коли один кореневий супутник виконує функції управління групою, забезпечуючи контроль польоту й координацію між іншими супутниками, і коли управління розподілене між усіма супутниками, що дає змогу уникати центральної точки відмови відповідно [8].

У розподілених супутникових системах використовуються адаптивні протоколи, які дають можливість урахувати особливості космічного середовища, такі як високі швидкості, шум і вплив ефекту Доплера. Основні протоколи, які використовуються: 3GPP (4G, 5G), LoRaWAN та NB-IoT, а також DVB-S2 [8].

Досягнуто значний прогрес у використанні стандартних одноплатних комп'ютерів (COTS – Commercial Off-The-Shelf) для створення обчислювальних модулів супутників. Це дало змогу значно знизити вартість розробки й впровадження супутникових систем, оскільки використовуються вже протестовані компоненти. Крім того, застосування таких технологій забезпечує високу гнучкість і можливість швидкого оновлення апаратного забезпечення відповідно до змін у вимогах IoT [6].

Документ підкреслює важливість застосування комерційно доступних компонентів (COTS) у супутникових системах. Зокрема, використання Wi-Fi-приймачів і GPS-приймачів дає змогу забезпечити ефективну комунікацію між супутниками, а також точне визначення їхнього відносного положення. Сенсори на основі поверхневих акустичних хвиль (SAW) вирізняються компактними розмірами й енергоефективністю, що робить їх ідеальними для інтеграції в малі супутники, такі як CubeSat. Для зв'язку між супутниками використовуються стандарти IEEE 802.11 та IEEE 802.15.4, які, хоч і розроблені для наземних систем, демонструють значний потенціал у космічному середовищі завдяки своїй надійності й гнучкості. Це рішення дає змогу створювати бездротові мережі як для комунікації між супутниками, так і для передачі даних усередині одного супутника [7].

Що стосується координації супутників, варто зазначити такі особливості: GPS-приймачі на кожному супутнику використовують сигнали від глобальної GPS-супутникової системи для визначення своїх координат у тривимірному просторі. Це здійснюється шляхом обчислення затримки сигналу, що надходить від декількох GPS-супутників одночасно. Отримані GPS-координати використовуються для синхронізації даних між супутниками. Супутники у формації обмінюються інформацією через міжсупутникові зв'язки (ISL), наприклад, Wi-Fi, що дає змогу коригувати їхні відносні траєкторії в режимі реального часу [7].

Для підтримання формації супутники використовують алгоритми управління відносною траєкторією. Використовується Leader-Follower конфігурації, де один супутник є ведучим, а інші коригують свої

траєкторії стосовно нього. Алгоритми враховують динамічні збурення, такі як аеродинамічний опір і сонячне випромінювання, що викликають зміщення супутників. Для підвищення точності використовуються фільтри Калмана, які обробляють дані GPS і коригують відносні положення з урахуванням шумів вимірювань і моделей орбітальної динаміки. Це дає змогу досягати точності позиціонування в межах кількох метрів навіть за умови високих швидкостей руху супутників [7].

Таким чином, концепція «розподіленого супутника» відкриває нові можливості для забезпечення широкосмугового зв'язку й ефективної обробки даних у рамках інтернету речей. Це дасть змогу вирішити проблеми передачі великих обсягів трафіку, покращити час відгуку та сприяти подальшому розвитку космічних технологій.

Перспективи подальших досліджень

– Інтелектуальне керування променями. Створити алгоритми машинного навчання для прогнозування тінювих зон у міжсупутникових лінках і динамічного налаштування гібридної ФАР у реальному часі.

– Ультратіське кодування протоколів. Розширити протоколи 5G-NTN адаптивними схемами FEC, стійкими до фазових шумів і доплерівських зсувів на ТГц-частотах.

– Теплова стабілізація антен. Дослідити композитні матеріали з високою теплопровідністю й малим коефіцієнтом теплового розширення для масивів, що працюють у вакуумі.

– Орбітальний тест-стенд. Провести місію-демонстратор із групою CubeSat для валідації ISL на 60–140 ГГц і збору статистики каналу в різних сонячних циклах.

Висновок

Огляд узагальнив ключові наукові й інженерні досягнення у сфері ТГц-зв'язку для розподілених супутникових систем і показав, що комбінація масивних MIMO, гібридного формування променів і GaN-електроніки здатна забезпечити кратно зростання пропускної здатності без непомірного збільшення енергоспоживання. Демонстраційні експерименти довели реальність лінків 1200 Мбіт/с на діапазоні 130–134 ГГц, а модель «розподіленого супутника» підтвердила потенціал скорочення затримок до кількох мілісекунд завдяки туманним обчисленням і локальній маршрутизації трафіку. Разом із тим робота виявила вузькі місця: складність теплового менеджменту, потребу в адаптивних протоколах та обмеження чинної регуляторної бази. Запропоновані напрями майбутніх досліджень мають на меті закрити ці прогалини, уможлививши поступ від лабораторних прототипів до повномасштабних орбітальних сервісів. У підсумку можна стверджувати, що системи ТГц-зв'язку є одним із ключових каталізаторів еволюції 6G-екосистеми та глобальної інфраструктури інтернету речей, а реалізація запропонованих досліджень наблизить створення стійких, високошвидкісних та енерго-ефективних супутникових мереж наступного покоління.

Література

1. Ilchenko M. Ye., Kuzmin S. Ye., Narytnik T. N., Belous O. I., Radzikhovsky V. N. Transceiver for 130–134 GHz band digital radio relay system *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*. 2013. № 72(17). P. 1623–1638.
2. Saiko V., Toliupa S., Brailovskyi M., Narytnik T., Nakonechnyi V., Shtanenko S. Mathematical Simulation of FMCW Radar Operation: Simulation of the Normalized Signal at the Receiver Input. *Proceedings of the 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)* / Lviv, Ukraine, 21–25 November 2023. IEEE, 2023. Electronic ISBN 979-8-3503-7257-1; Print on Demand ISBN 979-8-3503-7258-8. DOI: 10.1109/AICT61584.2023.10452695.
3. 6Genesis Flagship Program: Building the Bridges towards 6G-enabled Wireless Smart Society and Ecosystem. <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfi-fe2019081624413.pdf>.
4. Майборода І. М., Стороженко І. П., Бабенко В. П., Кайдаш М. В. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2016. Вип. 1. С. 45–46.
5. Ільченко М. Е., Наритник Т. Н., Рассомакін Б. М., Присяжний В. І., Капштик С. В. Створення архітектури «Розподіленого супутника» для низькоорбітальних інформаційно-телекомунікаційних систем на основі групи мікро- і наносупутників. *Інформаційні технології управління підприємствами, програмами і проектами*. С. 33–34.
6. Ilchenko M. Y., Narytnik T. N., Fisun A. I., Belous O. I. Terahertz range telecommunication systems Ilchenko. *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*. 2011. № 70(16). P. 1477–1487.
7. Ferrario A., Furlan B. CubeSat formation flying mission as Wi-Fi data transmission and GPS based relative navigation technology demonstrator. POLITECNICO DI MILANO. Academic Year, 2010–2011.
8. Ilchenko M. Ye., Narytnik T. N., Didkovsky R. M. Clifford algebra in multiple-access noise-signal communication systems Ilchenko. *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*. 2013. № 72(18). P. 1651–1663.
9. Ali E., Ismail M., Nordin R., Abdullah N. Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research. *Frontiers of Information*. 2017. 1 June. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1631/FITEE.1601817.pdf>.
10. Figueiredo F. A. P. de. Performance and Integration for 5G Massive MIMO. 2022. 14 April. C. 931–940.
11. Gershman A. B., Sidiropoulos N. D. Space-Time Processing for MIMO Communications. 2005. 22 April. ISBN: 9780470010020.
12. Jue G. A Sub-Terahertz MIMO Testbed for 6G Research. Keysight Technologies, Santa Rosa, Calif. 13 February 2024. <https://www.microwavejournal.com/articles/41448-a-sub-terahertz-mimo-testbed-for-6g-research>.

13. Николаєв С. Ю. та ін. Дослідження методів MIMO-інтеграції з технологіями п'ятого покоління. *Наукові записки ДУТ*. 2022. № 1–2(2). С. 46–53.
14. Ilchenko M. Ye., Kalinin V. I., Narytnik T. N., Cherepenin V. A. Wireless UWB ecologically friendly communications at 70 nanowatt radiation power *CriMiCo 2011 – 21st International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings*. 2011. P. 355–356. IEEE. DOI: 10.1109/CRMICO.2011.6068964.
15. Beiranvand J. Hybrid beamforming using massive antenna arrays for fixed sensor networks. Université de Limoges, 2023.

References

1. Ilchenko, M. Ye., Kuzmin, S. Ye., Narytnik, T. N., Belous, O. I., & Radzikovsky, V. N. (2013). Transceiver for 130–134 GHz band digital radio relay system. *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 72(17), 1623–1638.
2. Saiko, V., Toliupa, S., Brailovskyi, M., Narytnyk, T., Nakonechnyi, V., & Shtanenko, S. (2023). Mathematical simulation of FMCW radar operation: Simulation of the normalized signal at the receiver input. In *Proceedings of the 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AICT61584.2023.10452695>.
3. 6Genesis Flagship Program. (2019). Building the bridges towards 6G-enabled wireless smart society and ecosystem. Retrieved from: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfi-fe2019081624413.pdf>.
4. Maiboroda, I. M., Storozhenko, I. P., Babenko, V. P., & Kaidash, M. V. (2016). Review of achievements in terahertz communication systems. *Collected Scientific Works of the National Academy of the National Guard of Ukraine*, (1), 45–46 [in Ukrainian]
5. Ilchenko, M. E., Narytnyk, T. N., Rassomakin, B. M., Prysiashnyi, V. I., & Kapshtyk, S. V. (n.d.). Development of the architecture of a “distributed satellite” for low-orbit information and telecommunication systems based on a group of micro- and nanosatellites. *Information Technologies of Enterprise Management, Programs and Projects*, 33–34 [in Ukrainian]
6. Ilchenko, M. Y., Narytnik, T. N., Fisun, A. I., & Belous, O. I. (2011). Terahertz range telecommunication systems. *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 70(16), 1477–1487.
7. Ferrario, A., & Furlan, B. (2011). CubeSat formation flying mission as Wi-Fi data transmission and GPS-based relative navigation technology demonstrator. *Politecnico di Milano* [in English].
8. Ilchenko, M. Ye., Narytnik, T. N., & Didkovsky, R. M. (2013). Clifford algebra in multiple-access noise-signal communication systems. *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 72(18), 1651–1663.
9. Ali, E., Ismail, M., Nordin, R., & Abdullah, N. (2017). Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: Overview, classification, and trends for future research. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18(6), 753–767. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1631/FITEE.1601817.pdf>.
10. Figueiredo, F. A. P. de. (2022). Performance and integration for 5G massive MIMO. *Conference Proceedings*, April, 931–940.
11. Gershman, A. B., & Sidiropoulos, N. D. (2005). *Space-time processing for MIMO communications*. Wiley. ISBN: 9780470010020.
12. Jue, G. (2024). A sub-terahertz MIMO testbed for 6G research. Keysight Technologies. Retrieved from: <https://www.microwavejournal.com/articles/41448-a-sub-terahertz-mimo-testbed-for-6g-research>.
13. Nikolaiev, S. Yu., et al. (2022). Research on MIMO integration methods with fifth-generation technologies. *Scientific Notes of the State University of Telecommunications*, 1–2(2), 46–53 [in Ukrainian].
14. Ilchenko, M. Ye., Kalinin, V. I., Narytnik, T. N., & Cherepenin, V. A. (2011). Wireless UWB ecologically friendly communications at 70 nanowatt radiation power. In *CriMiCo 2011 – 21st International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings* (pp. 355–356). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CRMICO.2011.6068964>.
15. Beiranvand, J. (2023). Hybrid beamforming using massive antenna arrays for fixed sensor networks. Université de Limoges [in English].

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.05.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.06.2025
Дата публікації: 25.07.2025