

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-49>

УДК 621.396.96:621.396.73:004.77

КУЛЬЧИЦЬКИЙ Сергій

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0009-0009-8399-8542>

e-mail: serhii_kulchytskyi0212@tntu.edu.ua

ГОЛОТЕНКО Олександр

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0001-9251-8760>

e-mail: golotenko@gmail.com

СТАНЬКО Андрій

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0002-5526-2599>

e-mail: stanko.andrii@gmail.com

ІНТЕГРАЦІЯ СУПУТНИКОВИХ ТА НАЗЕМНИХ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ: АРХІТЕКТУРНІ КОНЦЕПЦІЇ

Інтеграція супутникових і наземних бездротових мереж розглядається як ключове рішення для забезпечення глобальної покриття і стійкості зв'язку в еру 5G та наступних поколінь. У цій роботі проаналізовано сучасні архітектурні концепції побудови гібридних супутниково-наземних мереж та визначено основні виклики, що постають при їх об'єднанні. Розглянуто перспективні технології і стандарти, зокрема неназемні мережі (NTN) у 5G, погляд на інтеграцію в майбутніх системах 6G, а також роль угруповань низькоорбітальних (LEO) супутників. Проведено аналіз прикладів реалізації інтегрованих систем – глобальних широкосмугових проєктів Starlink, OneWeb та Amazon Kuiper, з акцентом на їх архітектуру та досягнуті результати. На основі останніх досліджень і проєктів показано, що попри значні технічні перешкоди (затримки, доплерівський зсув, інтерференція, інфраструктурні та регуляторні проблеми), тенденції розвитку технологій мережевого керування, стандартів 3GPP та прогрес у виробництві супутників роблять інтеграцію супутникових і наземних мереж все більш досяжною.

Ключові слова: інтеграція мереж, NTN, LEO, супутникові мережі, конвергенція мереж.

KULCHYTSKYI Serhii, HOLOTENKO Oleksandr, STANKO Andrii

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

INTEGRATION OF SATELLITE AND TERRESTRIAL WIRELESS NETWORKS: ARCHITECTURAL CONCEPTS

The convergence of satellite and terrestrial wireless networks is increasingly recognized as a pivotal strategy for achieving ubiquitous global coverage and enhanced resilience in the evolving landscape of 5G and future 6G mobile communication systems. This paper delves into a comprehensive analysis of contemporary architectural frameworks designed for the construction of these hybrid satellite-terrestrial networks, meticulously identifying the primary technical and operational challenges that arise when these disparate network domains are interconnected. Furthermore, the study examines promising technological advancements and relevant industry standards that are facilitating this integration, with a particular focus on the non-terrestrial networks (NTNs) framework within the 5G ecosystem. Looking ahead, the paper also provides insights into the potential role and integration of such hybrid networks within the anticipated architecture of future 6G systems, highlighting the significant contribution expected from low-earth orbit (LEO) satellite constellations in realizing this vision. To provide concrete illustrations of the ongoing efforts in this domain, the paper presents an analysis of prominent examples of integrated system implementations, specifically focusing on the global broadband initiatives such as Starlink, OneWeb, and Amazon Kuiper. This analysis includes a detailed examination of their underlying network architectures and the progress and results they have achieved to date. Drawing upon the latest research findings and the experiences gained from these pioneering projects, the paper demonstrates that, despite the presence of substantial technical hurdles, including issues related to signal delays, Doppler shift, potential interference, infrastructure deployment complexities, and regulatory considerations, the prevailing trends in network management technologies, the ongoing evolution of 3GPP standards, and the significant advancements in satellite manufacturing are collectively rendering the seamless integration of satellite and terrestrial wireless networks an increasingly viable and achievable objective for the next generation of communication infrastructure.

Keywords: network integration, NTN, LEO, satellite networks, network convergence.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасне суспільство висуває зростаючі вимоги до всепроникного високошвидкісного бездротового зв'язку. Прогнозується, що до 2026 року обсяг мобільного трафіку сягне 226 ексабайт на місяць, причому до 91% цього трафіку генеруватимуть смартфони [1]. Однак навіть впровадження мереж 5G не гарантує повсюдного покриття – нині мережі 5G охоплюють лише близько 15% території земної кулі, а значна кількість людей і пристроїв у віддалених регіонах залишається поза зоною дії наземних мереж [2]. Забезпечення зв'язку в таких важкодоступних місцях (океанічні простори, пустелі, гірські райони тощо) традиційними наземними засобами економічно та технічно ускладнене. В цих умовах виникає ідея інтеграції супутникових систем

зв'язку з наземною інфраструктурою як шлях до реалізації справді глобального покриття та надійності мережі.

Інтеграція супутникових і наземних мереж стала одним із стратегічних напрямків розвитку телекомунікацій. Галузеві експерти відзначають, що для виконання довгострокових бізнес-планів операторів у еру 5G необхідно задіяти супутникові ресурси. Це зумовлено здатністю супутників забезпечувати зв'язок у регіонах, де будівництво наземної інфраструктури є нерентабельним або неможливим (на морі, в повітрі, у малонаселених районах), а також забезпечувати резервування на випадок стихійних лих чи аварій наземних мереж. Вже тепер з'являються практичні підтвердження цінності такої інтеграції: наприклад, супутниковий інтернет Starlink успішно використовувався для підтримки зв'язку під час війни в Україні та після стихійного лиха в острівній державі Тонга, де наземна інфраструктура була пошкоджена [17].

Протягом останніх років опубліковано низку оглядових досліджень, присвячених конвергенції супутникових і наземних систем зв'язку. Зокрема, в роботах [3] та [4] представлено комплексний аналіз підходів до інтеграції та окреслено відкриті проблеми. У більш пізніх дослідженнях пропонуються конкретні рішення для інтегрованих мереж – від використання мережевої віртуалізації та програмно-конфігурованих мереж (SDN) для згладжування протоколів між супутниками і базовими станціями, до методів координації трафіку (ATSSS) між 5G-мережею і супутниковим каналом.

Міжнародні стандарти також врахували цю тенденцію: організація 3GPP у версії Release-17 стандарту 5G New Radio включила підтримку неназемних мереж (NTN) – тобто можливість прямого підключення терміналів до супутників на орбіті як до базових станцій мережі [5]. У перспективних баченнях мереж 6-го покоління (6G) інтеграція наземних, повітряних (аеростатних, безпілотних) і космічних сегментів розглядається як обов'язкова умова для забезпечення повсюдної високошвидкісної передачі даних [6]. Згідно з «білою книгою» по 6G [18], майбутня мережа повинна безшовно інтерфейсуватися як з наземними, так і з супутниковими системами. Таким чином, актуальність теми інтеграції супутникових та наземних бездротових мереж постійно зростає, і вона є об'єктом досліджень та експериментальних проєктів у всьому світі [8].

У цій роботі здійснюється огляд архітектурних концепцій інтегрованих супутниково-наземних мереж та аналізуються основні технічні виклики на шляху їх реалізації. Окремо розглядаються новітні технології і стандарти, що сприяють конвергенції мереж (зокрема, 5G NTN, перспективи 6G, LEO-супутникові сузір'я), а також наводяться приклади існуючих систем (Starlink, OneWeb, Amazon Kuiper), які прокладають шлях до глобальних гібридних мереж.

Архітектурні концепції інтеграції супутникових і наземних мереж

● Багатошарова модель SAGIN

Інтегрована супутниково-наземна мережа (часто її називають Space-Air-Ground Integrated Network, SAGIN) поєднує різні платформи зв'язку – наземні стільникові базові станції, високоплатформні ретранслятори (аеростати, безпілотники) та орбітальні супутники – в єдину систему [3]. Мета такої архітектури – використати сильні сторони кожного середовища: наземні мережі забезпечують високу пропускну здатність і малу затримку в містах та агломераціях, тоді як супутники надають широке покриття над океанами, горами та іншими віддаленими територіями [4]. Існуючі однорідні мережі (лише стільникові або лише супутникові) не спроможні окремо задовольнити глобальні вимоги 6G щодо пропускну здатності та всюдисущості покриття. Тому архітектурно передбачається багатошарова мережа, де наземний шар тісно інтегрований із космічним. У найзагальнішому вигляді наземна інфраструктура (базові станції, ядро мережі) доповнюється супутниковим сегментом через шлюзи зв'язку, що інтерфейсують супутники з наземною опорною мережею. Кінцеві користувачі можуть підключатися до мережі як через звичайні наземні базові станції, так і безпосередньо через супутники – залежно від того, який канал доступний або оптимальний у конкретному місці та часу.

● NR-NTN та супутниковий бекхаул

Існують дві основні моделі інтеграції на рівні доступу:

Прямий супутниковий доступ користувача. В цьому сценарії користувачке обладнання (UE) може безпосередньо встановлювати зв'язок із супутником, який виступає своєрідною «повітряною базовою станцією». Такий підхід нині стандартизований в 3GPP як неназемна мережа NR-NTN (New Radio Non-Terrestrial Network) – супутник фактично виконує роль вузла радіомережі 5G, забезпечуючи з'єднання з ядром мережі по каналу назад (через наземну шлюзову станцію) [5].

Супутниковий бекхаул (магістральний канал). У цьому випадку кінцевий абонент обслуговується звичайною наземною базовою станцією стандарту LTE/5G, але трафік від цієї базової станції до ядра мережі передається не по наземній волоконно-оптичній або мікрохвильовій лінії, а через супутниковий канал. Супутник діє як ретранслятор, підключаючи віддалену базову станцію до операторської мережі (цей варіант часто використовується для забезпечення мобільного зв'язку на віддалених об'єктах – нафтових платформах, островах, кораблях). Обидві моделі можуть співіснувати та доповнювати одна одну в інтегрованій архітектурі, що відображено у концепції Multi-Access Edge Computing з супутниковим компонентом – коли мережа здатна

гнучко перемикає трафік абонента або на наземну, або на супутникову лінію залежно від умов (ця функціональність реалізована в 5G як механізм Access Traffic Steering, Switching and Splitting, ATSSS) [6].

• **Типи орбіт**

Супутниковий сегмент може включати апарати на різних орбітах – геостационарній (GEO), середній (MEO) та низькій навіколоземній (LEO). GEO-супутники знаходяться на висоті ~35 786 км і здатні охопити до 1/3 земної кулі одним апаратом, але мають велику затримку сигналу (близько 240 мс у напрямку «вгору-вниз»). Натомість LEO-сузір'я (висоти 500–1500 км) забезпечують значно меншу затримку (20–40 мс в одну сторону) ціною використання десятків або сотень апаратів для суцільного покриття. MEO-супутники займають проміжне положення (2000–20000 км) за охопленням і затримками.

Останнім часом також розглядається концепція дуже низької орбіти (VLEO) – нижче 300 км, що дозволяє ще більше знизити затримки та потужність передачі, але потребує вирішення питань аеродинамічного опору та частого коригування орбіти. У інтегрованій архітектурі можливе одночасне використання декількох шарів: наприклад, GEO-супутники можуть забезпечувати ширококомвні службові передачі (теле- і радіомовлення, мультимедіа), тоді як LEO-супутники – обслуговувати інтерактивний трафік користувачів з мінімальною затримкою. Наземна інфраструктура при цьому виконує локальну розподільчу функцію та надає послуги у зонах з високою щільністю абонентів. Така багатошарова мережа потребує узгодженого управління ресурсами між різними рівнями – від геостационарних супутників до наземних сот, що є предметом досліджень концепції Network of Networks у 6G. Порівняння VLEO, LEO, MEO та GEO подано в Таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння характеристик супутникових та наземних мереж

Мережа (приклад)	Затримка	Швидкість передавання
LEO-супутникова (Starlink)	~20 мс	80–150 Мбіт/с (користувач)
LEO-супутникова (OneWeb)	~70 мс	~7 Гбіт/с на супутник (агрег.)
GEO-супутникова (Konnnect VHTS)	600–700 мс	~500 Гбіт/с (агрегована)
Наземна 4G (LTE)	20–30 мс	до 300 Мбіт/с
Наземна 5G (NR)	<10 мс	10–50 Гбіт/с

• **Інтеграція на рівні мережевого ядра**

Окрім рівня доступу, важливим аспектом є архітектурне поєднання супутникових сегментів на рівні мережевого ядра та управління. Існує підхід, за яким супутникова мережа розглядається як не-3GPP доступ до ядра 5G. У такому випадку користувач, підключений через супутник, проходить аутентифікацію та передає дані в ядро мобільної мережі аналогічно до того, як це відбувається через Wi-Fi точки доступу (які також вважаються не-3GPP доступом). Для забезпечення якості обслуговування 3GPP визначено механізм ATSSS, що дозволяє керувати потоками даних між 3GPP-доступом (наземним) і альтернативним (супутниковим). З іншого боку, можлива тісніша інтеграція, коли супутники безпосередньо включені в архітектуру радіодоступу 5G (як згадано вище в моделі NR-NTN). В цьому випадку супутниковий сегмент повністю відповідає стандартному інтерфейсу радіомережі й “прозора” працює з ядром мережі, ніби то звичайна базова станція. Подібна архітектура потребує спеціальних рішень для мережевого рівня (NAP – network attachment point) на супутниках, щоб врахувати їх рух та затримки. Сучасні дослідження пропонують застосувати програмно-конфігуровану мережу (SDN) і віртуалізацію функцій (NFV) для абстрагування різниці між супутниковими і наземними сегментами. Зокрема, на борту супутників або в шлюзових станціях можуть працювати віртуалізовані мережеві функції, узгоджені з ядром 5G, що дозволить динамічно керувати маршрутами трафіку та протоколами.

В цілому, архітектурні концепції інтеграції передбачають плавне об'єднання двох різномірних середовищ зв'язку – із мінімальними змінами для користувачів. Ідеально, абонентські пристрої мають користуватися послугами мережі, не помічаючи, через який саме канал (наземний чи супутниковий) надходить сигнал. Реалізація такої прозорої інтеграції потребує подолання низки технологічних викликів, які детально розглянуті у наступному розділі.

Виклики та проблеми інтеграції

Попри значний прогрес у стандартизації та успішні експерименти, інтеграція супутникових і наземних мереж висуває серйозні технічні та організаційні виклики. Нижче окреслено основні з них.

• **Затримки поширення сигналу та продуктивність.**

Найочевиднішою проблемою є велика відстань до супутників, що спричиняє істотні затримки сигналу. Для наземного стільникового зв'язку відстань від мобільного до базової станції зазвичай

вимірюється сотнями метрів або кількома кілометрами, і поширення радіосигналу займає мікросекунди або одиниці мілісекунд. Натомість навіть найближчі LEO-супутники знаходяться на висоті ~500–1200 км, що додає близько 30 мс односторонньої затримки[7]. Для GEO-супутників цей показник у десятки разів більший – приблизно 120–150 мс в один бік. Такі затримки (а тим більше подвійні на круговий маршрут запит-відповідь) негативно впливають на роботу протоколів передачі даних, особливо чутливих до часу (наприклад, інтерактивні сервіси, онлайн-ігри, відеоконференції). В довгих каналах зростає й варіабельність затримки (джиттер) та ймовірність втрати пакетів при тимчасових замираннях сигналу. Проте, слід зазначити, що для багатьох масових інтернет-сервісів (веб-перегляд, потокове відео) затримки у десятки мілісекунд є прийнятними. Сучасні дослідження також показують способи адаптації – наприклад, налаштування протоколів TCP для роботи з великим часом обертання (в тому числі за рахунок буферизації та управління порядком пакетів, щоб уникнути перемішування через різні шляхи). Важливо, що у випадку LEO-супутників затримка ~20–40 мс співставна з деякими наземними мережами (наприклад, 4G в завантаженій мережі може давати 30–50 мс) [7]. Отже, хоча затримка залишається проблемою, для LEO-орбіт вона вже не є фатальною перешкодою і може бути прийнятною для багатьох сценаріїв.



Рис. 1. Спрощена архітектура інтегрованої супутниково-наземної мережі на прикладі розширення ядра 6G за рахунок LEO-супутника

- **Доплерівський зсув та рух супутників.**

Інтеграція супутників на низьких орбітах стикається з такою фізичною особливістю: LEO-супутники рухаються відносно земної поверхні з високою швидкістю (близько 7–8 км/с). Для приймача на землі це означає постійну зміну частоти сигналу через ефект Доплера. Частота передавача на супутнику до моменту прийому на землі може зміщуватися на кілька кГц, що залежить від швидкості зближення або віддалення супутника. Доплерівський зсув ускладнює підтримання стабільного радіозв'язку, особливо в системах з вузькою смугою (наприклад, IoT-сенсори). В 3GPP NTN передбачається, що термінали будуть оснащені системою супутникової навігації (GNSS), завдяки чому можуть вимірювати власну швидкість відносно орбітальних супутників і виконувати попередню компенсацію доплерівського зсуву частоти. Проте, ефективне управління доплерівським ефектом і перемикання сеансів зв'язку між швидкоплинними LEO-супутниками (так званий handover – перездача між супутниками) залишається сферою активних досліджень. Наприклад, потрібні алгоритми, що забезпечать безперервність з'єднання, коли один супутник заходить за горизонт і автоматично замінюється іншим для даного користувача.

- **Інтерфейс та сумісність протоколів.**

Історично супутникові системи зв'язку розвивалися окремо від стільникових стандартів, тому їх протоколи низького рівня і схеми доступу до середовища відрізняються. Спроба об'єднати їх стикається з проблемою сумісності цих протоколів і різних підходів до керування ресурсами. Наприклад, наземні мережі 5G використовують ортогональний множинний доступ з розподілом по часу та частоті (OFDM/TDMA) з точним синхруванням між базовими станціями, тоді як деякі супутникові системи можуть застосовувати інші схеми множинного доступу (CDMA, SC-FDMA тощо) та мають більшу несинхронність через затримки. Крім того, у наземних мережах існує функціонал частого обміну службовими повідомленнями (наприклад, про якість каналу, HARQ підтвердження), що в умовах великих затримок ускладнюється. Отже, інтероперабельність – узгодження протоколів двох світів – є викликом. Часткове рішення – впровадження проміжного шару трансляції протоколів або використання шлюзів, що виступають посередниками. Тут стають у пригоді SDN/NFV: можна розгорнути віртуальний мережевий функціонал на стику, який перетворюватиме протоколи наземної мережі в оптимізовану для супутника форму і навпаки. Стандарти 5G

вже містять певні механізми для цього – зокрема, згаданий ATSSS, а також профілі NTN для фізичного та каналного рівня, що регламентують адаптацію сигналу 5G NR до довгих затримок і доплерівських зсувів (через збільшення тривалості окремих символів, розширення вікон синхронізації тощо) [8].

• **Інтерференція та спільне використання спектру.**

При зближенні супутникових та наземних мереж виникає питання радіочастотного спектру: чи будуть вони працювати на тих самих частотах чи на різних? І той, і інший підходи мають свої складнощі. Якщо використовувати роздільний спектр (наземні мережі, наприклад, в діапазоні C-Band 3.5 ГГц, а супутникові – в Ku/Ka-діапазонах 10–20 ГГц), інтерференція між ними мінімальна, але це обмежує гнучкість – телефон не зможе легко переключитися на супутник, якщо його радіомодуль не підтримує потрібний діапазон. Натомість концепція спільного використання частот передбачає, що супутникові системи можуть працювати в тих самих діапазонах, що й наземні (наприклад, планується використання діапазону S ~2 ГГц для прямого зв'язку з телефонами через супутник). В такому випадку необхідно вирішити проблему взаємних завад. Супутниковий сигнал, будучи відносно слабким на поверхні (через велику відстань), може зазнавати перешкод від наземних передавачів на тій самій частоті, і навпаки – передача до супутника може втручатися в роботу наземних приймачів. Управління інтерференцією потребує координації: географічного розділення (наприклад, супутниковий канал активується лише там, де нема наземного покриття), використання вузькоспрямованих антен з формуванням променів, динамічного виділення піднесучих частот під різні системи. Дослідження показують, що ефективне спільне використання можливе, але вимагає розумних алгоритмів планування спектру [10]. У проекті ЄС H2020 SANSA було продемонстровано концепцію розумного управління спектром між супутниками і наземними реле з використанням адаптивних антенних решіток для зменшення взаємних завад. Отже, інтерференція – важливий технічний виклик, який доводиться враховувати при проєктуванні інтегрованих мереж.

• **Рух і безперервність обслуговування.**

Ще одним складним завданням є забезпечення безперервного обслуговування мобільних користувачів при переміщенні між сегментами мережі. У наземній стільниковій мережі реалізовано безшовну передачу сеансів (хендовер) між сусідніми базовими станціями. В інтегрованій мережі сценарії ускладнюються: користувач може переходити з зони наземного покриття в зону, де сигнал надходить лише від супутника, і навпаки. Потрібно, щоб сеанс зв'язку (наприклад, голосовий дзвінок або потокове відео) не обірвався при такому переході. Механізми ATSSS у 5G частково вирішують це, дозволяючи паралельно підтримувати два канали (наземний і супутниковий) і перемикаючи трафік між ними при погіршенні одного з них [20]. Проте, це вимагає наявності двох активних інтерфейсів і синхронізації на рівні мережевого протоколу. У 6G, очікується ще більш гнучка конвергенція на рівні мереж: користувачі матимуть універсальні приймачі, здатні працювати і з земними, і з космічними сигналами, а мережа – єдиний контроль стану підключення. Для реалізації цього необхідні вдосконалені схеми сигналізації в мережі, які б інформували контролери про доступність того чи іншого каналу і якісні метрики (затримка, рівень RSSI) для прийняття рішення про перемикання.

• **Обмеження користувацького обладнання.**

Якщо говорити про прямий супутниковий доступ для масових користувачів (наприклад, смартфонів), варто врахувати апаратні обмеження. Прямий зв'язок з супутником потребує антени з більшим підсиленням і потужнішим передавачем, ніж для стільникової базової станції (через велику відстань і втрати). Смартфони мають компактні антени і обмежену енергетику, тому традиційно прямий супутниковий зв'язок реалізовувався через спеціальні великі термінали (супутникові телефони з висувними антенами або стаціонарні VSAT-термінали) [15]. В інтегрованих мережах постає завдання мініатюризації та вдосконалення антен в користувацьких пристроях. Сучасні технології пропонують рішення у вигляді фазованих антенних решіток на основі електронного сканування, які можуть бути плоскими і встановленими на даху транспортного засобу або навіть інтегрованими в корпус смартфона. Наприклад, користувацькі термінали Starlink – це плоскі фазовані антени ~0,5 м діаметром, що автоматично стежать за супутниками на орбіті. Для смартфонів компанії-виробники розробляють менш габаритні рішення: вже зараз доступна функція супутникових повідомлень (SOS) на новітніх моделях, де використовується антена смартфона на частоті L-діапазону, а користувачу пропонується навести телефон у потрібному напрямку на супутник. Це поки що дає дуже обмежену пропускну здатність (лише текстові повідомлення). Надалі очікується поява спеціалізованих чипів та антен для мобільних пристроїв, що підтримують двосторонній ширококутовий супутниковий зв'язок. В 2023 році компанія AST SpaceMobile продемонструвала перший у світі дзвінок з звичайного смартфона, підключеного безпосередньо до супутника BlueWalker 3 на орбіті (через частоти стільникового діапазону) – це підтвердило принципову можливість використання наявних телефонів у супутниковій мережі [14]. Однак такі досягнення потребують подальшого доведення до масового продукту і стандартизації інтерфейсів [16].

• **Безпека і стійкість мережі.**

Об'єднання двох різних інфраструктур створює і нові вразливості. Супутникові канали можуть бути об'єктом навмисних завад (глушіння) або перехоплення, тож інтегрована мережа має враховувати механізми

захисту каналу (шифрування, автентифікація) і засоби виявлення глушіння. У той же час, сама наявність різномірних шляхів передачі може підвищити стійкість – за рахунок використання резервного каналу: наприклад, при атаці або відмові наземної мережі, супутниковий канал забезпечить аварійний зв'язок. Тому архітектура має включати моделі довіри між сегментами і узгоджені політики безпеки. 3GPP вже в своїх специфікаціях NTN визначає, що рівень захисту аутентифікації та шифру аналогічний до наземного 5G, тобто супутниковий сегмент повинен дотримуватися тих самих стандартів безпеки, що й наземний.

Підсумовуючи, інтеграція супутникових та наземних мереж ставить низку міждисциплінарних задач – від радіофізики (подолання затримок, доплера, інтерференції) до мережевого інжинірингу (протоколи, хендовери, безпека) та економіки (спільне використання інфраструктури, регулювання спектра). У наступних розділах розглянемо, які технологічні тенденції допомагають поступово вирішувати ці проблеми, а також проаналізуємо конкретні приклади систем, що втілюють принципи інтегрованих мереж на практиці.

Перспективні технології і стандарти для інтегрованих мереж

• 5G NTN і розвиток стандартів 3GPP.

Стільниковий стандарт 5G вперше офіційно включив підтримку супутників як складової частини мережі. У випуску 3GPP Release-17 (2022 рік) було затверджено специфікації неназемних мереж (NTN) для 5G NR, що визначають дві категорії: NR-NTN (ширококутний доступ через супутники для користувачів) та IoT-NTN (підтримка вузькокутового IoT – NB-IoT та LTE-M – через супутники). Таким чином, стандартом передбачено, що звичайний 5G-термінал може спілкуватися з базовою станцією, розміщеною на супутнику, з мінімальними змінами у протоколах. Було вирішено ряд технічних питань, зокрема введено більші інтервали часу для рандом-доступу, компенсацію доплера, спеціальні профілі сигналу для GEO і LEO супутників. Крім того, ще у Release-16 був проведений аналіз (в документі TR 38.821) різних сценаріїв супутникового доступу – трансляційного (прозорий ретранслятор) і регенеративного (супутник сам виконує функції gNB) – результати якого лягли в основу дизайну NTN [6]. Також 3GPP стандартизувала механізм ATSSS на рівні ядра (Release-16) – він дозволяє мережі одночасно використати 3GPP і не-3GPP доступ для сеансу користувача, що якраз співвідноситься зі схемою паралельного наземно-супутникового підключення. У перспективі Release-18 і далі (що відкривають шлях до 6G) очікується розширення підтримки інтегрованих мереж – зокрема, включення супутників з міжсупутниковими інтерфейсами (mesh-мережею на орбіті), інтеграція високоплатформних станцій (HAPS) і безпілотників як проміжних вузлів. Таким чином, діяльність зі стандартизації задає основу для сумісності обладнання різних виробників і створює єдину екосистему, де супутники будуть одним із типів вузлів мережі. Це надзвичайно перспективно, бо дозволить використовувати масове стільникове обладнання (чипсети в телефонах, базові станції) для супутникового зв'язку без дорогих спеціалізованих адаптерів.

• Мережеві технології для конвергенції.

На рівні керування мережею ключовими технологіями, що сприяють інтеграції, є програмно-конфігуровані мережі (SDN) та віртуалізація мережевих функцій (NFV). SDN дозволяє централізовано керувати різномірною інфраструктурою через програмні контролери, відокремлюючи керуючу площину від площини даних. У контексті супутниково-наземної інтеграції це означає, що можна мати єдиний центр керування трафіком, який “бачить” і наземні маршрути, і супутникові, та може динамічно перекомутувати потоки між ними [8]. NFV, своєю чергою, дає можливість розгорнути на стандартному обладнанні (серверах) мережеві функції, які раніше були прив'язані до спеціалізованих апаратних блоків. Наприклад, шлюз до супутникової мережі або контролер сеансів зв'язку можуть існувати як віртуальні машини або контейнери, що запускаються в хмарній інфраструктурі оператора. Це полегшує масштабування та адаптацію мережі під різні сценарії. Зокрема, для інтегрованої мережі можна розгорнути віртуальний EPC/5GC (ядро) ближче до місця призначення трафіку (на землі чи навіть на орбіті), щоб зменшити затримки. Розумне використання SDN/NFV значно спрощує інтероперабельність протоколів – є приклади архітектур, де SDN-контролер виступає посередником, перетворюючи сигнальні повідомлення наземного протоколу (NAPALM, NETCONF) у команди для супутникового сегменту, тим самим забезпечуючи узгодженість дій мережі [8]. Такі рішення наразі пропонуються як частина концепції мереж 6G, що будуть хмарними і програмно визначеними за своєю суттю.

• Технології множинного доступу і PHY-рівня.

На фізичному рівні в інтегрованих мережах активно впроваджуються сучасні методи, покликані підвищити спектральну ефективність і гнучкість. Однією з перспективних технологій є масивний MIMO з цифровим формуванням діаграм спрямованості. Для наземних базових станцій massive MIMO вже став звичним – антени з десятками елементів можуть скеровувати вузькі промені на конкретних користувачів, збільшуючи посилення і знижуючи інтерференцію. Аналогічно, на супутниках нині встановлюють активні антенні решітки, здатні утворювати багато променів на поверхні Землі (наприклад, сучасні супутники Viasat-3 чи OneWeb Gen2 матимуть цифрові фазовані решітки). Це дозволяє “розбити” покриття супутника на безліч невеликих зон обслуговування (spot beams) і повторно використовувати частоти у нескількох несуміжних зонах, підвищуючи пропускну здатність системи. Масивний MIMO в поєднанні з адаптивним управлінням

променями через SDN відкриває шлях до динамічного спрямування ресурсів туди, де є попит – скажімо, супутник може концентрувати потужність на регіон, де зараз багато активних користувачів, і перемикає промені в міру переміщення літаків чи кораблів. Ще одна технологія – NOMA (несортований множинний доступ) – досліджується для сумісного обслуговування наземних і супутникових абонентів. Суть NOMA полягає в одночасному обслуговуванні кількох користувачів на одній частоті шляхом накладання їх сигналів з різною потужністю та подальшого розділення на приймачі за допомогою SIC (послідовного інтерференційного скасування). В контексті інтеграції це може дозволити обслуговувати, наприклад, наземного користувача та супутникового користувача на одному каналі, розрізняючи їх за рівнем сигналу або кодом. Є пропозиції використати NOMA для поліпшення пропускної здатності у когнітивних сценаріях – коли супутникова мережа виступає первинною, а наземна вторинною (або навпаки), і вторинна може передавати, не заважаючи первинній понад допустимого порогу. Хоча NOMA ще не увійшла до стандартів, дослідження у цій сфері тривають, зокрема для 6G [8].

• **Штучний інтелект та керування ресурсами.**

Мережі наступних поколінь будуть надзвичайно складними та динамічними, тому планується широке залучення алгоритмів штучного інтелекту (AI) і машинного навчання для оптимізації роботи. Це також стосується інтегрованих супутниково-наземних мереж – AI може допомогти в задачах прогнозування трафіку і перемикання між каналами, оптимального планування променів супутників, виявлення аномалій (напр., спроб глушіння) та автономного прийняття рішень про перенаправлення потоків. Наприклад, модель машинного навчання може на основі історичних даних передбачити, що користувач на кораблі зайде в зону без наземного покриття через 5 хвилин, і заздалегідь ініціювати підключення через супутник, щоб перехід був непомітним. Або мережа може аналізувати патерни затримки і втрат пакетів на супутниковому каналі і коригувати параметри протоколів (вікно TCP, схеми ARQ) для максимізації пропускної здатності. У 6G концепції закладається, що AI буде проникати і в керуючу площину (наприклад, модуль RAN Intelligent Controller, RIC, в OpenRAN архітектурі), і в саму інфраструктуру (розподілені інтелектуальні вузли на краю мережі) [9]. Для інтегрованих мереж це означає появу самокерованих (self-organizing) супутниково-наземних систем, здатних адаптуватися до умов без ручного втручання. Проте впровадження AI потребує великої кількості даних телеметрії і добре продуманих механізмів відпрацювання рішень – помилка в AI-алгоритмі не повинна призвести до масового збою зв'язку.

• **Бортова обробка та міжсупутниковий зв'язок.**

Сучасні супутникові угруповання (особливо LEO) все більше оснащуються можливістю міжсупутникового зв'язку за допомогою лазерних або радіоліній. Це означає, що супутники можуть обмінюватися даними напряму один з одним на орбіті, формуючи своєрідний мережевий “хребет” у космосі. Для інтегрованої мережі така можливість надзвичайно цінна: вона дозволяє маршрутизувати трафік користувачів по орбіті, мінімізуючи кількість проміжних спусків на землю. Наприклад, якщо два користувачі знаходяться в віддалених районах і обидва підключені через супутники, то їх взаємний трафік може піти по ланцюжку супутників до точки найближчої до адресата, замість того щоб кожен супутник гнав потік на центральний шлюз. Це зменшує затримки і розвантажує наземну інфраструктуру. Система Starlink вже використовує лазерні лінки між своїми супутниками, створюючи глобальну орбітальну мережу передачі даних. У стандартизації 3GPP поки міжсупутникові інтерфейси не регламентовані, але для 6G прогнозується їх врахування. Виникає поняття orbital routing – динамічна маршрутизація на орбіті. Для її підтримки потрібні бортові процесори на супутниках, здатні виконувати функції мережевих маршрутизаторів/комутаторів. Такі “розумні” супутники стають частиною мережі не лише на рівні фізичного ретранслятора, а й на рівні мережевого (IP або навіть рівня застосунків). Це відкриває шлях до розподілу мережевих функцій між землею і орбітою – наприклад, частина ядра мережі може бути розгорнута прямо на супутниках, щоб приймати рішення про локальну комутацію трафіку. Хоча це ще експериментальні підходи, деякі проекти (наприклад, DARPA BlackJack в США) вже запускають малі супутники з бортовими маршрутизаторами на базі сучасних процесорів. В контексті інтегрованої мережі це можна розглядати як розширення хмарних обчислень в космос (Space Cloud), коли ресурси обробки даних розподілені між землею і орбітою для оптимального обслуговування запитів користувачів незалежно від їх місцезнаходження [12].

• **Технологія 6G.**

Хоча повномасштабна інтеграція супутників і наземних мереж ще не реалізована в мережах 5G, досвід, набутий зараз, стане фундаментом для 6G. Однією з основних цілей 6G є забезпечення глобального гігабітного підключення всюди, включно з малонаселеними та важкодоступними регіонами. Це неможливо без залучення супутникових систем. Очікується, що 6G буде мережою, де розмиваються межі між різними типами доступу – користувач просто підключений до “мережі 6G”, а далі сама мережа (керована AI) вирішує, через які ресурси його обслуговувати (через міліметровий діапазон наземної соти, терагерцовий Wi-Fi, LEO-супутник або оптичний лазерний лінк і т.д.). Уже зараз запущені ініціативи на рівні космічних та телекомунікаційних агентств: так, Європейське космічне агентство (ESA) спільно з асоціацією GSM (GSMA) у 2023 році започаткували програму прискорення взаємодії 5G/6G і супутників, а в Європейському Союзі затверджено план створення сузір'я IRIS² з ~170 LEO-супутників до 2027 року для забезпечення захищеного

урядового і комерційного зв'язку на території ЄС та Африки, яке має працювати у взаємодії з наземними операторами [19]. Подібні проекти свідчать, що інтеграція стане реальністю вже в найближчі роки, закладаючи основу для 6G.

Отже, поступальний розвиток стандартів, впровадження SDN/NFV, використання новітніх радіотехнологій і AI – все це поступово долає існуючі проблеми і робить супутниково-наземну конвергенцію технічно здійсненною. Для повної картини далі розглянемо декілька практичних прикладів діючих систем, які втілюють інтеграційні підходи або наближаються до них.

Приклади інтегрованих супутникових проєктів

- **Starlink (SpaceX)**

Станом на 2025 р. орбітує > 7000 LEO-супутників (~550 км). Сервіс 50–200 Мбіт/с із затримкою ~20 мс забезпечує домашній і корпоративний інтернет у десятках країн [11]. Starlink уже інтегрується з мобільними мережами: разом із T-Mobile готує прийом сигналу на звичайні смартфони (PCS-діапазон). Система довела ефективність у надзвичайних ситуаціях — в Україні підтримувала критичну інфраструктуру та військовий зв'язок [17]. Архітектура повністю регенеративна: маршрутизація відбувається прямо на супутниках, що є зразком майбутніх інтегрованих мереж.

- **OneWeb (Eutelsat OneWeb)**

У сузір'ї 618 супутників на 1200 км; глобальне покриття оголошено наприкінці 2023 р. [13]. Проєкт орієнтований на бекхаул для операторів і корпоративні послуги: Vodafone, Bharti Airtel тощо підключають віддалені 4G/5G-вежі через OneWeb. Після злиття з Eutelsat формується гібрид GEO + LEO-рішення: затримкочутливий трафік іде через LEO, об'ємний — через GEO. Таким чином OneWeb містить розрив між наземними й геостационарними сегментами.

- **Amazon Project Kuiper**

Amazon отримала ліцензію на 3236 LEO-супутників (~600 км); два тестові апарати запущено 2023 р., бета-тест стартує 2024 р., повне розгортання очікується до 2029 р. [12]. Kuiper інтегруватиметься з AWS: супутники напряду підключатимуться до хмарних дата-центрів, а партнерство з Verizon використовуватиме їх як бекхаул для стільникових веж. Масштабна клієнтська база Amazon і логістика можуть швидко вивести термінали на масовий ринок.

- **Інші ініціативи**

Китай розгортає LEO-проєкт Guowang (> 12 000 супутників). ЄС фінансує IRIS² (~170 супутників до 2027 р.), орієнтований на урядовий зв'язок та IoT [19]. У стандарті 3GPP Release-19 закладено підтримку NB-IoT NTN і екстрених викликів через супутник; Apple (Globalstar) та Qualcomm (Iridium) вже запустили базові функції SOS. Усе це підтверджує тренд «мережа мереж», де супутники стають черговим «сектором» наземної інфраструктури, забезпечуючи безшовний глобальний сервіс.

Усі ці приклади – Starlink, OneWeb, Kuiper та інші – демонструють різні аспекти конвергенції. Вони знаходяться на передовій розвитку технологій і водночас стикаються з викликами (регуляторними, фінансовими, технологічними), про які говорилося вище. Але загальна картина чітка: супутникові та наземні мережі поступово перестають розглядатися як окремі. Навпаки, ідеологія “network of networks” просувається в напрямку об'єднання: де супутник – це ще одна “вишка”, дрон – ще один ретранслятор, а оптичне волокно – ще один канал, і все це інтегровано для найкращого обслуговування користувача.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Інтеграція супутникових та наземних бездротових мереж переходить від стадії концепцій і досліджень до практичної реалізації. Проведений аналіз показує, що за останні кілька років відбувся значний прорив у цій галузі: стандарти 5G вперше формалізували підтримку супутників (NTN), провідні технологічні компанії розгортають масштабні LEO-сузір'я, а оператори зв'язку починають включати супутникові канали у свою інфраструктуру. Архітектурно інтегровані мережі базуються на багатошаровому підході – поєднанні різних орбітальних систем з наземними стільниковими осередками через уніфіковане мережеве керування. Це дає можливість досягти раніше недосяжних показників покриття і стійкості: користувачі зможуть отримувати зв'язок практично в будь-якій точці планети, а мережі стануть менш уразливими до локальних пошкоджень.

Разом з тим, реалізація повної конвергенції супроводжується значними викликами. В роботі окреслено ключові проблеми – фізичні (затримки, доплерівські зсуви, інтерференція), протокольні (сумісність різних стандартів, забезпечення seamless handover), апаратні (антени для терміналів) та інші. Сучасні тенденції в технологіях пропонують шляхи їх вирішення: використання низьких орбіт та міжсупутникових лінків суттєво знизило затримки; впровадження AI і SDN обіцяє ефективне керування ресурсами між сегментами; поступ розвитку напівпровідників і антен робить можливим створення супутникових модулів навіть для смартфонів. Ще однією тенденцією є тісна співпраця між супутниковою та телеком-індустрією: утворюються альянси, спільні проєкти (як-от 5G-ALLSTAR, або партнерства SpaceX з операторами), що

пришвидшують інтеграцію знань і стандартів. Регулятори також йдуть назустріч – з’являються нові правила виділення частот під сумісний супутниково-наземний доступ, державні програми (ЄС IRIS², тощо) з розвитку інтегрованої інфраструктури [20].

Проаналізувавши конкретні системи – Starlink, OneWeb, Kuiper – можна зробити висновок, що концепція інтеграції вже проходить випробування у реальних умовах. Starlink фактично створив першу глобальну мережу нового типу, де орбітальна і наземна компоненти (термінали, шлюзи) працюють у тісному тандемі, а його досвід використовується для інтеграції зі стільниковими операторами. OneWeb і Kuiper невдовзі доповнять ринок, привносячи конкуренцію та взаємне вдосконалення технологій. Очікується, що у другій половині 2020-х років ці системи почнуть надавати і послуги прямого доступу до мобільних телефонів, вбудовуючись у екосистему 5G/6G. Це стане, мабуть, остаточним кроком до повної інтеграції – коли користувацький пристрій динамічно перемикатиметься між наземною і супутниковою мережею, а оператори керуватимуть єдиною гібридною інфраструктурою.

Підсумовуючи, інтеграція супутникових та наземних бездротових мереж перестала бути футуристичною ідеєю, а перетворилася на конкретний план дій індустрії. Протягом 2020-х років ми є свідками формування “мережі мереж” – глобальної комунікаційної платформи, що поєднує різні висоти і середовища передачі. Це відкриє нові можливості для телекомунікацій: від забезпечення інтернетом літаків та поїздів у режимі реального часу до створення справді всепланетних IoT-систем, де кожен сенсор у пустелі чи на океані буде на зв’язку. Інтегровані супутниково-наземні мережі стануть невід’ємною частиною 6G-епохи, забезпечуючи принцип “зв’язок повсюди і завжди”.

Література

1. Ericsson. (2023). *Ericsson mobility report*. Ericsson AB.
2. GSMA. (2024). *The mobile economy 2024*. GSM Association.
3. Wang, P., Zhang, H., Liu, Y., Samarakoon, S., & Li, Q. (2020). Convergence of satellite and terrestrial networks: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 8, 5550-5588.
4. Guidotti, A., Pizzi, S., Vanelli-Coralli, A., Caus, M., & Ronga, L. (2020). Satellite-terrestrial integrated networks: A practical view. *IEEE Access*, 8, 165178-165200.
5. 3GPP. (2020). *Technical Report 38.821 v16.0.0: Solutions for NR to support non-terrestrial networks*. 3rd Generation Partnership Project.
6. 3GPP. (2022). *Technical Specification 38.101-5: NR; User equipment radio transmission and reception; Part 5: Satellite access* (Rel. 17).
7. Tirmizi, S. B. R., Ahmed, A., Malik, S. U. R., & Znamenskiy, I. (2022). Hybrid satellite-terrestrial networks toward 6G: Vision and challenges. *Sensors*, 22(21), 8544.
8. Ayofe, O. A., Onime, C., & Olowu, T. O. (2024). SDN-based integrated satellite-terrestrial networks: Opportunities and challenges. *Technologies*, 12(12), 263.
9. Zhao, D., Li, N., Wang, X., & Yang, L. (2023). Competition and convergence of satellite and terrestrial networks. In *Proc. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting* (pp. 1–6).
10. SANSA Consortium. (2021). *Shared Access Terrestrial-Satellite Backhaul Network enabled by Smart Antennas (SANSA): Final report* (H2020 Project).
11. Pultarova, T. (2025). Starlink satellites: Facts, tracking and impact on astronomy. *Space.com*. <https://www.space.com>
12. Associated Press. (2025). Amazon launches its first internet satellites in a step toward space-based broadband. *NPR*. <https://www.npr.org>
13. Clark, S. (2023). Indian launch gives OneWeb enough satellites for global internet service. *Spaceflight Now*. <https://spaceflightnow.com>
14. AST SpaceMobile. (2023). *BlueWalker-3 mission update* [Press release].
15. Apple Inc. (2022). *Emergency SOS via satellite: Technical brief*.
16. Lynk Global. (2022). *Lynk receives first commercial FCC licence for satellite-to-phone service* [Press release].
17. Henry, C. (2022). SpaceX’s Starlink helps reconnect Tonga after eruption. <https://spacenews.com>
18. Latva-aho, M., & Leppänen, K. (Eds.). (2020). *Key drivers and research challenges for 6G* (White paper). 6G Flagship, University of Oulu.
19. Henry, C. (2022). Europe approves multi-orbit IRIS² constellation. *SpaceNews*. <https://spacenews.com>
20. 5G-ALLSTAR Consortium. (2021). *Deliverable D6.1: SDN-based 5G-ALLSTAR prototype and demonstration*.

References

1. Ericsson. (2023). *Ericsson mobility report*. Ericsson AB.
2. GSMA. (2024). *The mobile economy 2024*. GSM Association.
3. Wang, P., Zhang, H., Liu, Y., Samarakoon, S., & Li, Q. (2020). Convergence of satellite and terrestrial networks: A comprehensive

survey. *IEEE Access*, 8, 5550-5588.

4. Guidotti, A., Pizzi, S., Vanelli-Coralli, A., Caus, M., & Ronga, L. (2020). Satellite-terrestrial integrated networks: A practical view. *IEEE Access*, 8, 165178-165200.

5. 3GPP. (2020). *Technical Report 38.821 v16.0.0: Solutions for NR to support non-terrestrial networks*. 3rd Generation Partnership Project.

6. 3GPP. (2022). *Technical Specification 38.101-5: NR; User equipment radio transmission and reception; Part 5: Satellite access* (Rel. 17).

7. Tirmizi, S. B. R., Ahmed, A., Malik, S. U. R., & Znamenskiy, I. (2022). Hybrid satellite-terrestrial networks toward 6G: Vision and challenges. *Sensors*, 22(21), 8544.

8. Ayofe, O. A., Onime, C., & Olowu, T. O. (2024). SDN-based integrated satellite-terrestrial networks: Opportunities and challenges. *Technologies*, 12(12), 263.

9. Zhao, D., Li, N., Wang, X., & Yang, L. (2023). Competition and convergence of satellite and terrestrial networks. In *Proc. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting* (pp. 1–6).

10. SANS Consortium. (2021). *Shared Access Terrestrial-Satellite Backhaul Network enabled by Smart Antennas (SANS): Final report* (H2020 Project).

11. Pultarova, T. (2025). Starlink satellites: Facts, tracking and impact on astronomy. *Space.com*. <https://www.space.com>

12. Associated Press. (2025). Amazon launches its first internet satellites in a step toward space-based broadband. *NPR*. <https://www.npr.org>

13. Clark, S. (2023). Indian launch gives OneWeb enough satellites for global internet service. *Spaceflight Now*. <https://spaceflightnow.com>

14. AST SpaceMobile. (2023). *BlueWalker-3 mission update* [Press release].

15. Apple Inc. (2022). *Emergency SOS via satellite: Technical brief*.

16. Lync Global. (2022). *Lync receives first commercial FCC licence for satellite-to-phone service* [Press release].

17. Henry, C. (2022). SpaceX's Starlink helps reconnect Tonga after eruption. <https://spacenews.com>

18. Latva-aho, M., & Leppänen, K. (Eds.). (2020). *Key drivers and research challenges for 6G* (White paper). 6G Flagship, University of Oulu.

19. Henry, C. (2022). Europe approves multi-orbit IRIS² constellation. *SpaceNews*. <https://spacenews.com>

20. 5G-ALLSTAR Consortium. (2021). *Deliverable D6.1: SDN-based 5G-ALLSTAR prototype and demonstration*.