

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-10>

УДК 621.391

Микола ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>

e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Ганна ВАРГАТЮК

Вінницький національний технічний університет

e-mail: annaantonuik@gmail.com

Діана НІКІТОВИЧ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8907-1221>

e-mail: diananikitovych@gmail.com

ІНТЕГРОВАНА СУПУТНИКОВА МЕРЕЖА 6G

Досліджено технології побудови багатоланкової супутникової ретрансляції доступу до інформаційних послуг користувачам, які зазвичай перебувають поза досяжністю телекомунікаційних радіосистем з архітектурою прямої ретрансляції, що дозволяє традиційним сервісам надавати свої послуги майже всім користувачам у всьому світі, а також корисно для таких сервісів як глобальне повідомлення про надзвичайні ситуації та реагування на стихійні лиха. Розроблено способи забезпечення універсального та розширеного робочого покриття інфокомунікаційними радіомережами 6G у глобальному масштабі із використанням супутникових технологій.

Розглянуто можливості забезпечення тривимірного покриття наземними станціями 6G за рахунок інтеграції із транзитними супутниковими мережами для розширення бездротових наземних послуг. Досліджено особливості формування прямих з'єднань для забезпечення послуг фіксованого та мобільного зв'язку в мережі 6G з використанням супутникових технологій. При цьому, супутникова мережа в одному тунелі передає дані користувача, та сигнали керування, а обробка даних користувача може проводитися безпосередньо в супутниковій мережі як різновид корисного навантаження. Також розглянуто особливості застосування тривимірного покриття для технології IoT у віддалених районах з обмеженням розгортання наземних базових станцій або без них. Оскільки сенсорні пристрої IoT споживають невелику кількість енергії і часто знаходяться в режимі очікування, вони можуть вимагати спеціальної підтримки з боку супутникової мережі, наприклад спеціальних команд керування для включення пристроїв.

Визначено особливості проектування структури мережевого елемента та архітектури супутникової частини мережі доступу для зменшення затримки в кожному телекомунікаційному вузлі маршрутизації. Розглянуто супутникові мережі, які використовуються для інтерактивних послуг, таких як передача голосу та даних. Зокрема здійснений аналіз затримки для HAPS та супутників, включаючи випадки як з одним переходом, так і з кількома, який показує, що передача сигналу через неназемну частину мережі може забезпечити меншу затримку, ніж та, яка досягається за допомогою сучасної ВОЛЗ. При цьому, досягнута перевага залежить від висоти платформи неназемної мережі (NTN) та відстані між двома точками на землі. Також необхідно враховувати деякі відмінності у швидкодії супутникового тракту через рух супутника, що в найгіршому випадку збільшить затримку при передаванні даних користувача. Визначено, що показник затримки можна покращити, якщо наземна станція (або користувач) може бачити кілька супутників та згодом вибирати той, який мінімізує затримку із врахуванням типу інтерфейсу.

Ключові слова: багатоланкова супутникова ретрансляція доступу, інфокомунікаційна радіомережа 6G, супутникова технологія, телекомунікаційний вузол маршрутизації, платформа неназемної мережі, супутниковий тракт.

Mikola VASYLKIVSKYI, Hanna VARGATYUK, Diana NIKITOVYCH

Vinnitsia National Technical University

INTEGRATED 6G SATELLITE NETWORK

Technologies for building multi-link satellite relay access to information services to users who are usually beyond the reach of telecommunication radio systems with a direct relay architecture have been explored, which allows traditional services to provide their services to almost all users around the world, and is also useful for services such as global emergency notification and response to natural disasters. Methods have been developed to ensure universal and extended operational coverage of 6G radio information communication networks on a global scale using satellite technologies.

The possibilities of providing three-dimensional coverage by 6G ground stations due to integration with transit satellite networks for the expansion of wireless terrestrial services are considered. The peculiarities of the formation of direct connections for providing fixed and mobile communication services in the 6G network using satellite technologies have been studied. At the same time, the satellite network transmits user data and control signals in one tunnel, and user data processing can be carried out directly in the satellite network as a type of payload. Features of the application of 3D coverage for IoT technology in remote areas with limited deployment of ground base stations or without them are also considered. Because IoT sensor devices consume a small amount of power and are often in standby mode, they may require special support from the satellite network, such as special control commands to turn on the devices.

Design features of the structure of the network element and the architecture of the satellite part of the access network are determined to reduce the delay in each telecommunication routing node. Satellite networks used for interactive services such as voice and data are considered. In particular, a delay analysis is performed for HAPS and satellites, including both single-hop and multi-hop cases, which shows that the transmission of the signal over the non-terrestrial part of the network can provide lower delay than that achieved with the current HOL. At the same time, the advantage achieved depends on the height of the non-

terrestrial network (NTN) platform and the distance between two points on the ground. It is also necessary to take into account some differences in the speed of the satellite path due to the movement of the satellite, which in the worst case will increase the delay in the transmission of user data. It has been determined that the delay performance can be improved if the ground station (or user) can see multiple satellites and subsequently select the one that minimizes the delay given the type of interface.

Keywords: multi-link satellite relay access, 6G information communication radio network, satellite technology, telecommunication routing node, non-terrestrial network platform, satellite path.

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

У телекомунікаційній галузі в цілому і зокрема в інфокомунікаційних радіомережах, що виходять за рамки технології 5G, сформувалась наукова зацікавленість до процесу інтеграції неназемних мереж, таких як супутники, NAPS та дрони з наземними телекомунікаційними мережами. Така інтеграція спрямована на створення бездротової мережі, що охоплює території, що ще не обслуговуються та забезпечує тривимірне покриття [1]. Хоча покриття бездротового зв'язку продовжує зростати з кожним впровадженням наступного покоління бездротової технології, в деяких географічних регіонах все ще можуть існувати прогалини в обслуговуванні, зокрема там, де розгортання базової станції з провідним підключенням є неекономічним або неможливим.

Незважаючи на те, що неназемні мережеві технології часто вважають конкурентами наземних аналогів, у деяких мережевих структурах вони можуть сприйматися як функціональне доповнення, і їхню роль необхідно розглядати в залежності від того, є вони орбітальними чи ні. Враховуючи особливості архітектури, системи передавання на висотних платформах (NAPS), безпілотні літальні апарати та повітряні кулі не є орбітальними платформами та, як правило, сумісні з існуючими мережевими архітектурами інфокомунікаційних систем. Ці платформи спеціально розгорнуті для покриття певного географічного регіону. З іншого боку, орбітальні платформи, зазвичай, розгортаються у форматі глобальної топології, тому можуть забезпечити розширене покриття.

Дослідження в ряді областей, пов'язаних із супутниковою мережею роблять загальнодоступною особливу функціональність, властиву лише супутниковим мережам, що дозволяє операторам мобільних мереж пропонувати нові послуги та створювати нові джерела доходів. Спираючись на переваги супутникових мереж, інтегрована мережа 6G перевершує багато можливостей інших бездротових та дротових технологій.

Аналіз досліджень та публікацій

В космічних системах запуску багаторазового використання та виробництві супутників нині спостерігається помітний технічний прогрес, що знижує вартість розгортання штучних супутників. Передбачається, що технічні інновації та скорочення витрат продовжаться і що недорогі супутникові технології та пов'язані з ними системи запуску будуть повністю готові до розгортання інфокомунікаційних мереж 6G.

Супутникова технологія викликає дедалі більший інтерес при побудові високопродуктивних телекомунікаційних мереж. При цьому, для мінімізації затримок супутникового зв'язку необхідно використовувати штучні супутники з низькою навколосемною орбітою (LEO) або з дуже низькою навколосемною орбітою (VLEO). Через відносно невелику висоту обертання кожен із них може забезпечити лише обмежене покриття. В результаті, потрібно збільшувати мережі чи мегасузир'я. Такі компанії, як SpaceX і Amazon знаходяться на етапі використання або придбання ліцензій на розгортання угруповань, що складаються з кількох тисяч супутників для своїх мереж Starlink [1, 2] або Kuiper [3]. Супутникові інфокомунікаційні мережі орієнтовані на надання широкосмугових послуг передачі з підвищеною пропускнуною спроможністю у порівнянні із послугами, наданими через геостационарні супутники.

Для формування розширеного угруповання супутників компанія Starlink має використовувати близько 40000 супутників [1, 2] як у полярній, так і в похилій орбітальній конфігурації. Компанія Amazon має використовувати лише конфігурації супутникової мережі з похилою орбітою із робочою топологією у трьох орбітальних площинах.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розроблення способів забезпечення універсального та розширеного робочого покриття інфокомунікаційними радіомережами 6G у глобальному масштабі із використанням супутникових технологій.

Виклад основного матеріалу

Консорціум 3GPP виявив значний інтерес до використання штучних супутників у системах мобільного зв'язку. Наприклад, загальна архітектура супутникової мережі та пов'язані проблеми описані у 3GPP TR38.811 [4, 5], а деякі потенційні рішення задокументовані у 3GPP TR38.821 [5]. В даний час існуючі рішення призначені для прямого з'єднання між телекомунікаційним обладнанням і супутником, а також для

підключення до віддаленого радіоінтерфейсу і базового вузла з різними рівнями інтеграції протоколу радіозв'язку безпосередньо всередині супутників. Цей єдиний на сьогоднішній день підхід застосовується, коли супутники забезпечують передачу бездротового трафіку тільки в базову мережу RAN. Повна цінність супутникових мереж розкривається лише тоді, коли штучні супутники підтримують підключення до RAN, базової мережі та навіть до інтернету в цілому (у цьому випадку підключення до інтернету часто називають широкосмуговим доступом). Таке різноманітне підключення дозволяє супутниковим мережам стати невід'ємною частиною системи доступу 6G та не залишатися незалежною системою, що потребує взаємодії між мережами.

Враховуючи фундаментальні закони фізики супутникова мережа перебуває у безперервному русі. Штучний супутник обертається навколо Землі еліптичною траєкторією з центром Землі в одному фокусі еліпса. Більшість супутників, що використовуються для зв'язку, розгорнуті на майже круговій орбіті, тобто міжфокусна відстань наближається до нуля. Положення супутника зазвичай визначається як прямокутник, що оточує номінальну точку на круговій орбіті. Орбіта зазвичай характеризується номінальною висотою супутника та нахилом орбіти. Орбіта, що перетинає безпосередньо полюси, називається полярною орбітою і має нахил 90° , в іншому випадку вона називається похилою орбітою.

Нахил орбіти визначає північну та південну крайні точки, що покриваються супутником. Нахил та властивості спрямованої до землі антени визначають максимальні та мінімальні широти, які можуть бути покриті певною орбітою. Сукупність супутників називається угрупованням. При цьому, кілька супутників, що утворюють телекомунікаційну радіомережу, можуть переміщатися однією або різними орбітами. Геометрія угруповання впливає на його здатність забезпечувати глобальне покриття. Для кругових та майже кругових орбіт найбільш важливими варіантами угруповання є полярна та дельта-патерн Уокера (структура Баларда) [1].

Сузір'я, що складаються з полярних орбіт, забезпечують повне глобальне охоплення. Однак, хоча більшість супутників рухатимуться в одному напрямку, у двох випадках супутники на одній орбіті рухатимуться у напрямку, протилежному супутникам на сусідній орбіті. При цьому, канали міжсупутникового зв'язку змушені постійно змінювати конфігурацію. В результаті, утворюється область у форматі орбітального шва (orbital seam), яка впливає на пропускну здатність, оскільки трафік, що проходить через шов, піддається неоптимальній маршрутизації. Крім того, ускладнюється супровід інтерфейсу, під час перетинання супутниками полюсів, оскільки міжсупутникові лінії між орбітами зазвичай відключені на полюсах.

При використанні декількох похилих орбіт утворюються угруповання Уокера без швів, оскільки супутники залишаються майже нерухомими щодо супутників на сусідніх орбітах, поки не досягнуть вершини своїх орбіт (наприклад, коли супутник, що рухався на північ, починає рухатися на південь). В процесі руху супутників на південь, перетинаючи інші орбіти, вони набувають можливості формувати додаткову суміжність (adjacency), яку можна використовувати для маршрутизації даних із застосуванням додаткового інтерфейсу «п'ятого каналу» із можливостями швидкого відстеження. Однак використання п'ятого каналу може бути неможливим, оскільки це може призвести до утворення швів. (П'ятим каналом називають канал, який з'єднує супутники, що рухаються в протилежних напрямках щодо один одного у групуванні Уокера.) Оскільки покриття угруповання Уокера обмежене нахилом, воно може бути непридатним, коли для забезпечення покриття високих широт потрібні супутники на низькій навколосеземній орбіті. Для подолання даного обмеження, такі компанії, як SpaceX (Starlink), розгортають мережі, що поєднують у собі обидва типи орбітальних угруповань, покриваючи різні висоти і забезпечують глобальне покриття. Наприклад, користувачі в полярних регіонах будуть отримувати доступ до супутників на сильно нахилених орбітах (наприклад, навколополярних орбітах) разом з кінцевими пристроями, здатними працювати при малих кутах місця, а користувачі у вищих широтах також використовуватимуть аналогічні пристрої.

У певних сценаріях, зокрема при великих відстанях, угруповання супутників на низькій навколосеземній орбіті може забезпечувати порівнянну чи навіть меншу затримку, ніж наземна волоконно-оптична мережа, оскільки радіохвилі та світло поширюються у вільному просторі швидше, ніж світло в оптичному волокні.

Для інтеграції з системою 6G можна використовувати традиційне з'єднання з каналом прямої ретрансляції (де супутник діє як простий ретрансляційний вузол), так і більш просунуте мережеве з'єднання (коли трафік ретранслюється між джерелом і пунктом призначення на великих відстанях при використанні декількох супутників). Це може бути реалізовано за допомогою технології ISL або шляхом організації супутників для ретрансляції між собою трафіку через наземні станції.

Технологія багатоланкової супутникової ретрансляції може надати доступ до інформаційних послуг користувачам, які зазвичай перебувають поза досяжністю телекомунікаційних радіосистем з архітектурою прямої ретрансляції (наприклад, користувачів на кораблях чи літаках), і навіть наземних користувачів. Це не тільки дозволяє традиційним сервісам надавати свої послуги майже всім користувачам у всьому світі, але також корисно для таких сервісів як глобальне повідомлення про надзвичайні ситуації та реагування на стихійні лиха.

В залежності від висоти орбіти супутника із використанням складних багатооболонкових мереж або мереж космічної ретрансляції можна забезпечити глобальне покриття та низьку затримку при використанні супутникового угруповання із використанням сотні або навіть тисячі супутників. При цьому, технологія 6G зумовить розвиток інтегрованої супутникової архітектури за допомогою нових критично важливих методів маршрутизації та адресації. Це, у свою чергу, дозволить супутниковим угрупованням функціонувати у форматі спільної платформи маршрутизації, яку можна використовувати як базову технологію для удосконалення системи мобільного зв'язку [6].

Супутникова технологія розширює зону покриття до районів, які недостатньо обслуговуються бездротовими мережами. Супутник LEO може покривати область із радіусом близько 300 км. Але за допомогою технології ISL або наземних ретрансляційних станцій площу покриття можна розширити і зрештою охопити більшу частину земної кулі. В результаті оператори зможуть охопити набагато більшу зону покриття та реалізувати нові можливості обслуговування. При цьому, супутникові мережі не лише виступають як прості маршрутизатори або ретранслятори, але й зможуть надавати різні типи послуг. Такі мережі, хоча насамперед і націлені на розширення систем мобільного зв'язку, повинні дозволяти надавати кілька послуг через загальне, але повнодоступне ядро мережі. Для цього, перед тунелюванням через супутникову мережу послуги мають бути відображені на загальному рівні, зазвичай на рівні IP.

Інтегрована супутникова мережа в системі 6G відрізняється від наземних мереж через безперервний рух супутників. Тому, важливо добре розуміти ключові особливості архітектури, щоб реалізувати повне тривимірне покриття. В результаті, наземна система мобільного зв'язку може бути розширена аж до космічного простору, особливо коли певна її частина розміщується в супутникових системах.

Використання супутників LEO дозволяє досягти меншої затримки, ніж та, що забезпечується існуючими волоконно-оптичними мережами. При радіочастотній передачі в мікрохвильовому діапазоні затримка в системі передачі приблизно дорівнює швидкості світла у вакуумі. У волоконно-оптичних системах наявність заломлення знижує швидкість передачі приблизно до 68% швидкості світла у вакуумі. На великих відстанях це зниження може бути значним порівняно з передачею радіочастотного каналу, і, незважаючи на велику відстань до супутника LEO, супутниковий маршрут може мати більшу швидкодію. Мікрохвильові канали передавання типу «точка-точка» зазвичай забезпечують низьку затримку, але в багатьох випадках наземне розгортання обладнання ускладнене (наприклад, над горами) або неможливе (наприклад, над океанами). У таких випадках для забезпечення оптимальної якості обслуговування з точки зору мінімальної затримки можуть використовуватися супутники.

Зокрема, доцільно розглянути два випадки. Перший випадок із кількома переходами, який включає передачу трафіку через кілька супутників і великі відстані (наприклад, навколо Землі). При цьому, об'єднуються кілька трактів ISL. Другий варіант передбачає пряму ретрансляцію на основі використання супутника для ретрансляції наземного трафіку. Іноді таку ретрансляцію називають «колінчастим каналом», і це поняття також стосується конфігурації NAPS. Наступні дослідження ґрунтуються на затримці розповсюдження без урахування затримки обладнання та на припущенні, що волоконно-оптичний тракт безпосередньо з'єднує дві наземні точки без бічних відхилень. Насправді, завжди буде деяке відхилення, внаслідок чого довжина волоконно-оптичного тракту буде більшою, ніж довжина прямої радіолінії зв'язку, що, у свою чергу, призводить до більш складних процесів проектування [7].

Загальну геометрію супутникової траси у порівнянні з наземною трасою показано на рис. 1 а. Тракт передавання передбачає з'єднання висхідної та низхідної ліній зв'язку, а також множинні з'єднання між супутниками. Для простоти перший та останній супутники показані безпосередньо над наземними користувачами, а супутниковий тракт представлений у вигляді дуги (пунктирна лінія). Насправді супутник може перебувати безпосередньо над наземними користувачами, і показаний шлях передачі буде складатися з безлічі відрізків прямих ліній між кількома супутниками. Відстань між двома точками а і b землі зазвичай розраховується за формулою гаверсінусу і позначається на рисунку як S_{ab} . Довжина супутникового каналу збільшується на коефіцієнт, пов'язаний з висотою, як показано на рис. 1 а.

Основними факторами, що формують різницю в поширенні між наземною волоконно-оптичною лінією зв'язку (ВОЛЗ) та космічною супутниковою лінією зв'язку, є зниження швидкості світла у волокні через показник заломлення матеріалу волокна і збільшену довжину супутникового тракту, який також включає два переходи «земля-супутник». Для радіочастотної лінії зв'язку «земля-космос» і ISL затримка поширення сигналу визначається швидкістю світла у вакуумі. Враховуючи, що показник заломлення у волокні дорівнює 1,47 тому, швидкість поширення сигналу становить приблизно 68% швидкості світла у вакуумі. Довжини шляху поширення наземного сигналу між двома точками а і b зазвичай розраховуються як шлях дугою великого кола між цими двома точками на земній поверхні, показаний як S_{ab} на рис. 1 а. Супутниковий тракт є серією оптичних каналів «точка-точка» у вільному просторі. При високій щільності супутників проміжні ланки тракту апроксимуються дугою у сфері з радіусом, рівним радіусу Землі плюс висота супутника. Загальна затримка поширення сигналів через супутниковий тракт може бути розрахована, враховуючи відстань як суму довжин двох каналів доступу «земля-космос».

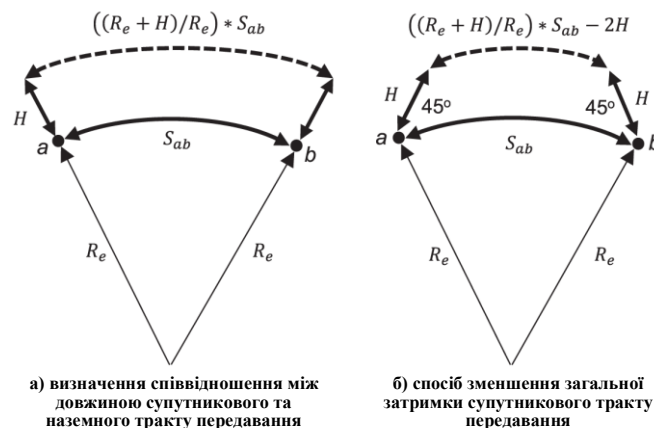


Рис. 1. Схема визначення параметрів супутникового тракту передавання даних

Отже, якщо взяти будь-які дві точки на землі, а і b, та знаючи висоту орбіти супутника, то можна порівняти затримку поширення сигналу супутниковим трактом з наземним волоконно-оптичним трактом. Отриманий результат допоможе визначити доцільність використання супутників, як показано на рисунку 2., де зменшення затримки має критично важливе значення.

Можна бачити, що верхня межа виникає там, де супутник знаходиться на орбіті приблизно 2000 км, і відстань, яку необхідно подолати, щоб виправдати такий високий супутник, має становити майже половину кола Землі. В результаті, для досягнення більш низької затримки, ніж у волоконно-оптичних каналах, знадобиться використання LEO на висоті 600 км і нижче, припускаючи, що всі шляхи відносно прямі (як на землі, так і в космосі).

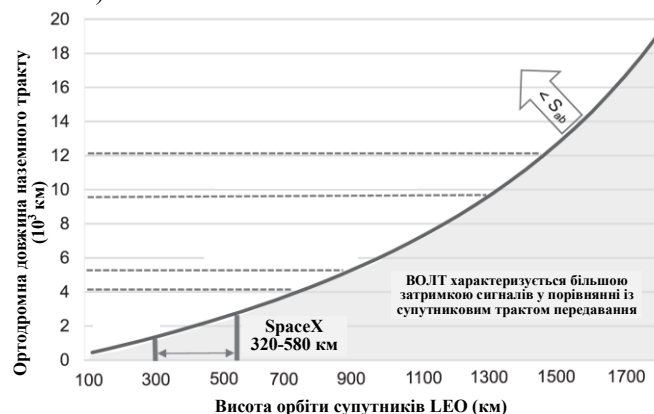


Рис. 2. Визначення діапазону ефективного функціонування супутників LEO за умови використання прямих трактів та відсутності апаратних затримок

Виконані дослідження передбачали сценарій, де супутник знаходиться безпосередньо над наземною станцією або кінцевим пристроєм. Варто зазначити, що насправді загальний шлях може бути коротшим, ніж показано на рисунку 2. У кращому випадку супутниковий тракт проходить по дузі великого кола між наземними станціями або кінцевими пристроями, які спостерігають обидва супутники з помірним нахилом, як показано на рис. 1 б. Однак, довжина радіотракту залежить від відносного розташування наземних станцій або кінцевого обладнання та щільності угруповання. Через рух супутників відносно наземних станцій чи терміналів ця мінімальна затримка буде тимчасовим явищем. Через рух супутників користувач зіткнеться зі зміною затримки розповсюдження. Тим не менш, цей приклад дає хорошу оцінку нижньої межі затримки [8].

Припустивши, що супутникова мережа ретранслює інформаційний трафік через кілька супутників, однак у певних сценаріях трафік може бути безпосередньо ретрансльований на іншу наземну станцію або кінцевий пристрій через один перехід, на відміну від ретрансляції через кілька супутників і таку ретрансляцію іноді називають «колінчастим каналом». У випадку використання сузір'я LEO застосування прямої ретрансляції може відігравати велику роль при організації передачі трафіку на межі мережі. Однак, варто зазначити, що використання послуг через супутник GEO для такої конфігурації призведе до надмірної затримки [9].

При застосуванні одноперехідної передачі через супутник порівнюємо затримку передачі сигналу між двома користувачами у ВОЛЗ та через дві лінії зв'язку земля-космос. Для простоти розрахунку нехтуємо

впливом кривизни Землі і припускаємо, що наземна ВОЛЗ безпосередньо з'єднає двох користувачів.

Затримка поширення по космічному тракту безперервно змінюватиметься через рух супутника. При цьому, мінімальна затримка буде мати місце, коли супутник знаходиться на однаковій відстані від користувачів. Для забезпечення оптимальної пропускну здатності мережі супутники перемикатимуться, і фактично перемикання найчастіше відбувається, коли супутник знаходиться безпосередньо над одним із користувачів. Зауважимо також, що як максимальна, і мінімальна затримки поширення також змінюватимуться залежно від висоти супутника.

На рис. 3 а показаний приклад мінімальної та максимальної затримки розповсюдження для супутника LEO, що працює на висоті 395 км. В результаті, на невеликих відстанях наземний волоконно-оптичний тракт (ВОЛТ) забезпечує меншу затримку. Але через зниження швидкості світла в оптичному волокні (ОВ) затримка поширення сигналів у ВОЛЗ зростає швидше ніж затримка поширення радіосигналів в космічному тракті. При використанні каналу передавання із топологією «точка-точка» та довжиною приблизно 750 км мінімальна затримка в супутниковому тракті краще, ніж в ОВ. Але, при довжині тракту передавання 750 км також можуть бути випадки, коли затримка супутникового тракту перевищує затримку наземного волокна через рух супутника. Також можна спостерігати, що максимальна затримка супутникового тракту збігається із затримкою наземної ВОЛЗ, коли довжина ОВ становить приблизно 1000 км.

Аналогічні співвідношення можна побачити для систем HAPS, які працюють на меншій висоті. Наприклад, як показано на рис. 3 б, для системи HAPS, що працює на висоті 20 км, затримка поширення від точки до точки перевищує затримку, що виникає у ВОЛЗ на відстанях приблизно 50 км. Насправді довжина ОВ буде більшою, що, у свою чергу, збільшує затримку в ньому, тоді як супутник забезпечує кращу швидкодню порівняно з ВОЛЗ.

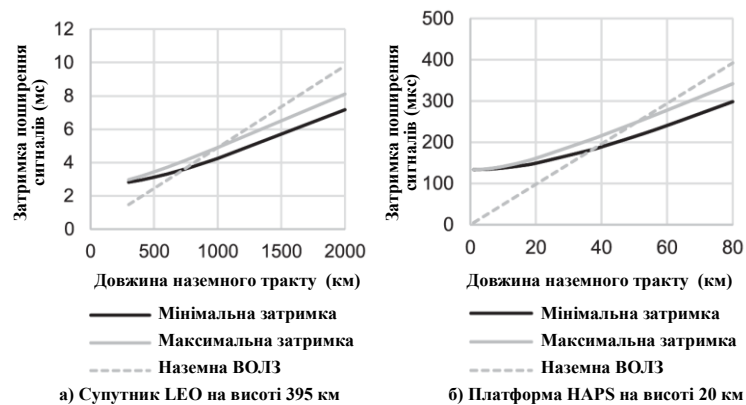


Рис. 3. Затримка розповсюдження сигналу для супутників LEO та HAPS

Для систем HAPS та супутників співвідношення, при якому мінімальна та максимальна затримки перевищують затримку у ВОЛЗ є фіксованим, що можна побачити на рис. 4, який показує області, які використовуються як для платформ HAPS, так і для супутників LEO. Область, позначена пунктирною лінією, є перехідною зоною між звичайним та орбітальним польотами, а система HAPS зазвичай працює на висоті від 20 до 25 км. З іншого боку, хоча конкретна межа не визначена, супутники LEO зазвичай працюють на висоті близько 300 км.

Навіть коли затримки супутника або системи HAPS перевищують затримки у ВОЛЗ, переваги систем HAPS та супутників полягають у їхньому розширеному покритті. При цьому, не потрібно здійснювати укладання волоконно-оптичного кабелю (ВОК), тому послуги можна розгортати швидше (і найчастіше дешевше).

Передбачається, що послуги, які надаються супутниковими мережами у системі 6G, забезпечать повнодоступну можливість підключення для наземних користувачів. Бездоганна інтеграція з наземними мережами надання послуг розширеного доступу має першорядне значення, зокрема: прямі послуги (наприклад, прямий ширококутовий зв'язок через виділені супутникові приймачі); непрямі послуги, такі як мережа мобільного зв'язку або інші послуги ретрансляції (наприклад, послуги передачі даних для комерційних авіарейсів). У мережі 6G також знадобиться можливість прямого зв'язку користувач-користувач і машина-машина, зокрема між транспортними засобами (тобто V2X). Для реалізації різноманітних варіантів використання, згаданих у [10] можуть бути передбачені різні типи підтримки з боку архітектури.

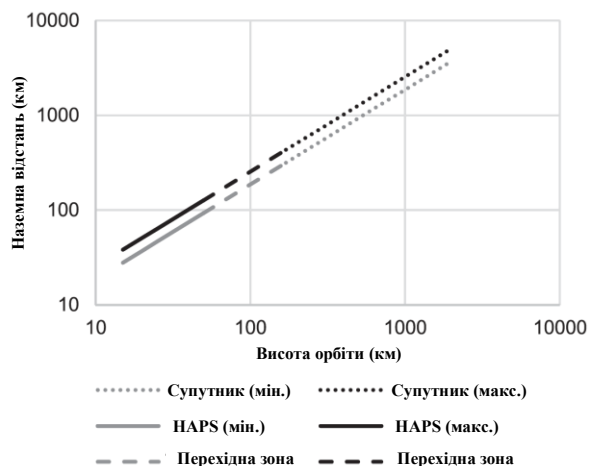


Рис. 4. Оцінювання затримки HAPS або супутника у відповідності до затримки сигналів у ВОЛТ «точка-точка»

Для забезпечення тривимірного покриття наземним станціям 6G потрібні нові способи інтеграції із супутниковими мережами. Супутникові мережі можуть діяти як транзитні мережі для розширення бездротових наземних послуг, як показано на рис. 5. Супутникові мережі можуть обслуговувати прямі з'єднання в мережі 6G, як видно на рис. 6, для забезпечення послуг фіксованого та мобільного зв'язку. На рис. 6 супутникова мережа має пряме з'єднання з обладнанням користувача. При цьому, супутникова мережа в одному тунелі передає дані користувача, та сигнали керування. Не виключено, що обробка даних користувача може проводитися безпосередньо в супутниковій мережі як різновид корисного навантаження. У цьому випадку супутникова мережа може надавати окремі тунелі.

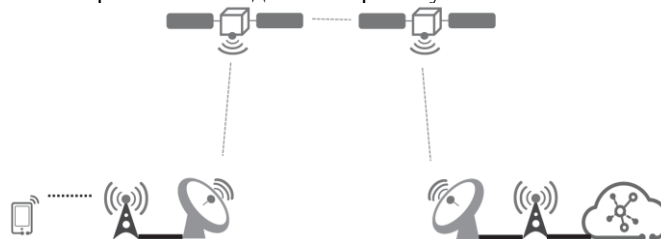


Рис. 5. Сегмент супутникової транзитної мережі

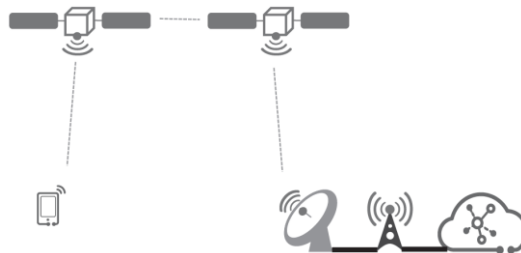


Рис. 6. Сегмент супутникової мережі прямого доступу

Схема мобільного зв'язку також може бути розширена для поєднання кількох користувачів за допомогою пристрою з одним супутниковим каналом. Оскільки кожен користувач може передавати дані в різні напрямки призначення, тому пристрій ущільнення використовується у системі супутникової маршрутизації для відповідної обробки трафіку (рис. 7).

Для спрощення архітектура сегменту телекомунікаційної мережі на рис. 7 показує маршрутизацію інформаційного трафіку на Землі. У деяких випадках маршрутизація може бути виконана стаціонарним літальним апаратом (наприклад, HAPS) з транзитом даних через супутникову мережу. Архітектура супутникової мережі HAPS та наземних пристроїв агрегації інформаційного трафіку користувачів ідентичні.

Тривимірне покриття особливо важливе для технології IoT при застосуванні у віддалених районах з обмеженим розгортанням наземних базових станцій або без них (наприклад, датчики, які використовуються для моніторингу лісових пожеж та змін клімату). Використовуючи модель, показано на рис. 5 супутникові мережі можуть формувати підключення до Інтернету речей або мереж датчиків. Оскільки сенсорні пристрої IoT споживають невелику кількість енергії і часто знаходяться в режимі очікування, вони можуть вимагати спеціальної підтримки з боку супутникової мережі, наприклад спеціальних команд керування для включення пристроїв.

Враховуючи схожість протоколів маршрутизації у космічному просторі із протоколами для наземних мереж, але відмінності є критичними, і тому супутникову мережу необхідно розглядати як окремий рівень маршрутизації у складі системи 6G. Аналогічно ієрархії всередині звичайної багаторівневої мережі, обмін між мережами теж відповідає формату клієнт-сервер. В такому випадку супутник постає як серверний рівень для інформаційних даних, наданих клієнтом, наземною мережею або прямим користувачем. При цьому, способи передачі даних через мережу відрізняються в залежності від задіяної технології в клієнтській мережі [10].

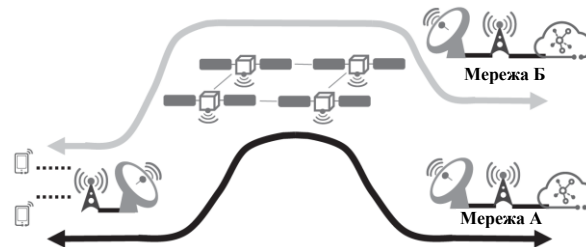


Рис. 7. Сегмент супутникової системи маршрутизації із обробленням інформаційного трафіку

Супутникова мережа дозволяє забезпечити можливість передачі інформаційних даних у пакетній формі. Оскільки така телекомунікаційна мережа в основному має підключатись до мереж на основі IP, в архітектурі супутникової мережі клієнтські сигнали будуть передаватися з використанням моделі тунелю, аналогічною до тієї, яка застосовується в наземних мережах передачі даних. Таким чином, з'єднання користувачів будуть здійснюватися через тунелі між точками доступу користувачів до супутникових мереж (або всередині самих супутників) і наземними шлюзами або іншими користувачами, залежно від ситуації. Оскільки при передачі через супутниковий канал неможливо безпосередньо реалізувати маршрутизацію інтернету або навіть маршрутизацію постачальника послуг, необхідно використовувати модель тунелю, яка інкапсулює і передає дані користувача з адресами, придатними для супутникової мережі [1].

У наземних телекомунікаційних мережах система маршрутизації направляє пакет до кінцевого пункту призначення, який зазвичай знаходиться поруч із конкретним шлюзом. При цьому, маршрутизація до цього шлюзу може вважатися оптимальною, якщо вона заснована на збігу найдовшого префіксу. Але у певних режимах роботи супутникової мережі (наприклад, через проблеми з живленням) може бути доцільніше здійснювати маршрутизацію до альтернативного проміжного шлюзу, а потім остаточну маршрутизацію до місця призначення по наземній мережі, як показано на рис. 8.

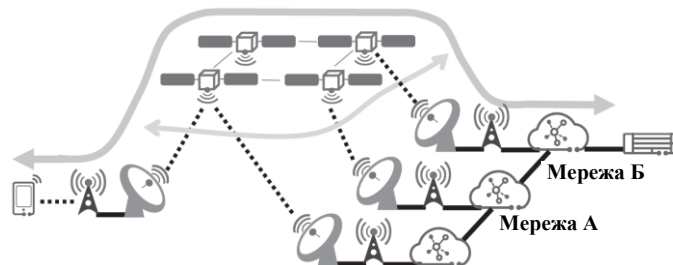


Рис. 8. Оптимізований сегмент супутникової мережі доступу

Оскільки, система маршрутизації має підтримувати вищезазначену функцію, тому механізми маршрутизації в космічному просторі потребують подальшого поліпшення для інтеграції з мережами 6G. Наприклад, в наземних мережах і існуючих протоколах маршрутизації адреси джерела та одержувача засновані на підмережах і не включають пряму інформацію про географічне розташування пристроїв. Оскільки при цьому не враховується мобільність мережевих елементів, під час розробки нової архітектури необхідно враховувати підтримку мобільності за допомогою низки механізмів. В результаті, необхідно провести дослідження того, як ідентифікатор та розташування кожної кінцевої станції у поєднанні з географічною маршрутизацією можуть вирішити проблему мобільності в цьому контексті.

У супутникових мережах 6G схема адресації може бути заснована на географічних адресах, тобто адресами джерела та одержувача вважаються відповідні географічні положення, а не IP-адреси. За умови, коли маршрут можна було визначити географічною відстанню між пунктом призначення та багатьма відомими проміжними супутниками, стало б концептуально легше визначити витрати на маршрутизацію. Найкоротшим шляхом між двома точками на земній кулі називається маршрут великого кола, як показано на рис. 9. Тому маршрутизація, заснована на мінімізації цієї відстані, називається ортодромною маршрутизацією, і подальші дослідження з цього питання, як і раніше, становлять інтерес.

В даний час у наземних мережах не існує операційної моделі, яка враховує рух супутників над різними адміністративними регіонами або країнами, тому може знадобитися її адаптація за допомогою різних систем ОА&М та маршрутизації [9].

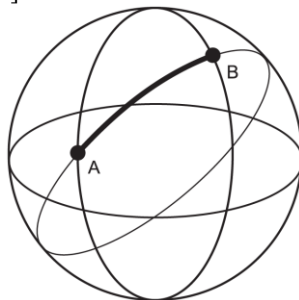


Рис. 9. Технологія ортодромної маршрутизації в супутникових мережах доступу

При цьому, необхідно розглянути можливість створення системи зв'язку для ОА&М інтегрованої супутникової мережі 6G, що, у свою чергу, дозволить наземним центрам управління керувати будь-яким супутником сузір'я, тоді як ці супутники посилають оновлення стану та відповіді. В результаті, вимоги ОА&М не виконуватимуться лише у тому випадку, якщо супутник несправний або перебуває поза межами досяжності наземної станції. Це означає, що пакетна мережа також повинна підтримувати пересилання пакетів даних ОА&М та їх надсилання відповідно до бортового програмного забезпечення супутників. Можна досягти результату за допомогою різних методів, серед яких найбільш поширений метод для наземних пакетних мереж включає перенесення пакетів рівня керування та рівня даних по загальним каналам зв'язку між маршрутизаторами. Для ОА&М у супутникових мережах найбільш економічний метод включатиме загальний рівень керування маршрутизацією, окремі рівні даних та попереджувальний контрольований підканал QoS на ISL. З причин, які обговорювалися в [10], неможливо використовувати існуючі рівні керування ОА&М, такі як OSPF/ISIS, або існуючу адресацію ОА&М.

При цьому, також важливо визначити інтерфейс між супутниковою та наземною системами ОА&М, якщо вони належать різним бізнес-об'єктам, що дуже важливо для забезпечення цілісної експлуатації та керування послугами. Через складну природу супутникових угруповань в експлуатації та адмініструванні супутникових мереж значну позитивну роль може зіграти машинне навчання.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розглянуто супутникові мережі, які використовуються для інтерактивних послуг, таких як передача голосу та даних. Зокрема здійснений аналіз затримки для HAPS та супутників, включаючи випадки як з одним переходом, так і з кількома, який показує, що передача сигналу через неназемну частину мережі може забезпечити меншу затримку, ніж та, яка досягається за допомогою сучасної ВОЛЗ. При цьому, досягнута перевага залежить від висоти платформи неназемної мережі (NTN) та відстані між двома точками на землі. Також необхідно враховувати деякі відмінності у швидкодії супутникового тракту через рух супутника, що в найгіршому випадку збільшить затримку при передаванні даних користувача.

У випадку використання одиночного переходу, для типових висот на низькоорбітальній орбіті, що становлять приблизно 400 км, характеристики супутникового тракту починають дорівнювати характеристик наземного ВОЛТ, коли відстань між користувачами становить приблизно 750 км. На відстані близько 1000 км супутник починає працювати краще, ніж типова ВОЛЗ між двома користувачами. При збільшенні відстані між користувачами вказана перевага продовжує зростати і буде обмежуватися тільки зоною радіопокриття, яка залежить від висоти орбіти. Важливо враховувати те, що наземні користувачі у більшості випадків використовують ВОСП з довжиною ВОЛТ, яка перевищує географічну відстань між користувачами. Тому, наземні системи передавання також включатимуть кілька вузлів обслуговування між географічно віддаленими засобами ширококутових послуг, в яких користувачі можуть зіткнутися з кількома елементами маршрутизації, кожен з яких збільшує затримку. Їхня наявність залежить від мережі, але зазвичай скорочує відстань, на якій NTN забезпечує кращу затримку в порівнянні з ВОЛЗ.

При використанні багатоланкового супутникового тракту приріст швидкодії аналогічний попереднім результатам досліджень. Основною відмінністю є обмеженість неназемної частини мережі лише структурою угруповання, а не зоною покриття одного супутника. За умови правильної конструкції мережевого елемента супутникова частина мережі може бути спроектована так, щоб зменшити затримку для кожного вузла. Оскільки, у випадку з безліччю переходів кожен користувач отримує доступ до різних супутників, і кожен супутник може робити внесок у додаткову затримку на тракті. Зрештою це може призвести до більш широкого діапазону зміни затримки, але, оскільки використовується кілька супутників, еквівалентна затримка наземного тракту буде значною, і за допомогою багатоланкового супутникового тракту все ж таки можна досягти зниження загальної затримки.

Приріст швидкодії, що забезпечується NTN, обумовлений особливостями сучасної волоконно-оптичної технології. Хоча NAPS і супутники можуть забезпечити кращу затримку в тракті, але також необхідно враховувати інші фактори, які впливають на затримку для кожної мережі. До них відносяться кут місця, щільність угруповання, тип угруповання та механізми маршрутизації. Показник затримки можна покращити, якщо наземна станція (або користувач) може бачити кілька супутників та згодом вибирати той, який мінімізує затримку. Можливість вибору може залежати і від типу інтерфейсу.

Розглянуті способи універсального та розширеного робочого покриття інфокомунікаційними радіомережами 6G у глобальному масштабі полягають на використанні супутникових технологій, зокрема: оптимізованої супутникової маршрутизації до альтернативного проміжного шлюзу, а потім остаточної маршрутизації до місця призначення по наземній мережі; супутникової системи маршрутизації із додатковим обробленням інформаційного трафіку.

Література

1. Space exploration holdings, LLC, SpaceX non-geostationary satellite system, attachment A, technical information to supplement schedule S. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083/1569860>.
2. Space exploration holdings, LLC, SpaceX non-geostationary satellite system, attachment A, technical information to supplement schedule S. <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20200526-00055/2378671>.
3. Kuiper systems LLC, technical appendix, application of Kuiper systems LLC for authority to launch and operate a non-geostationary satellite orbit system in Ka-band frequencies. <https://fcc.report/IBFS/SATLOA-20190704-00057/1773885>.
4. 3GPP, Study on new radio (nr) to support non-terrestrial networks, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.811, July 2020, version 15.3.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3234>.
5. 3GPP, Solutions for NR to support non-terrestrial networks (ntn), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.821, Dec. 2019, version 16.0.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3525>.
6. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Челоян В.А. Спектральний метод оцінювання джитеру в телекомунікаційних системах. - Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2010, № 2, С. 109-114.
7. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Кичак В.М. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах: Монографія. - Вінниця: ВНТУ, 2015. - 140 с.
8. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Стальченко О.В. Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів. - Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.–2013, № 2.– С.82-85.
9. Васильківський, М., Нікітович, Д., & Болдирева, О. (2022). Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 5–17. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1>
10. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>

References

1. Space exploration holdings, LLC, SpaceX non-geostationary satellite system, attachment A, technical information to supplement schedule S. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083/1569860>.
2. Space exploration holdings, LLC, SpaceX non-geostationary satellite system, attachment A, technical information to supplement schedule S. <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20200526-00055/2378671>.
3. Kuiper systems LLC, technical appendix, application of Kuiper systems LLC for authority to launch and operate a non-geostationary satellite orbit system in Ka-band frequencies. <https://fcc.report/IBFS/SATLOA-20190704-00057/1773885>.
4. 3GPP, Study on new radio (nr) to support non-terrestrial networks, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.811, July 2020, version 15.3.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3234>.
5. 3GPP, Solutions for NR to support non-terrestrial networks (ntn), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.821, Dec. 2019, version 16.0.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3525>.
6. Bortnyk G.G., Vasytkivskiy M.V., Cheloyan V.A. Spektral'nyy metod otsinyuvannya dzyhteru v telekomunikatsiynyykh systemakh. - Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu, 2010, № 2, S. 109-114.
7. Bortnyk G.G., Vasytkivskiy M.V., Kychak V.M. Metody ta zasoby pidvyshchennya efektyvnosti otsinyuvannya fazovoho dryzhannya syhnaliv u telekomunikatsiynyykh systemakh: Monohrafiya. - Vinnytsya: VNTU, 2015. - 140 s.
8. Bortnyk G.G., Vasytkivskiy M.V., Stalchenko O.V. Device for analog-digital conversion of high-frequency signals. - Measuring and computing equipment in technological processes.–2013, No. 2.– P.82-85.
9. Vasytkivskiy M., Nikitovych, D., & Boldyreva, O. (2022). Keruvannya dostupom do informatsiynyykh danykh v intelektual'nykh infokomunikatsiynyykh merezhakh. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 5–17. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1>
10. Vasytkivskiy M., Varhatiuk, H., & Boldyreva, O. (2022). Doslidzhennya arkhitektury shtuchnoho intelektu dlya infokomunikatsiynyykh merezh 6G. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>