

УДК 621.396.4

DOI: 10.31673/2412-9070.2021.030311

Я. А. КРЕМЕНЕЦЬКА, доктор техн. наук;

А. О. МАКАРЕНКО, доктор техн. наук, професор;

Н. В. РУДЕНКО, канд. техн. наук;

А. В. БЕРЕЗНЮК, аспірант;

С. Г. ЛАЗЕБНИЙ, аспірант;

В. П. ЯКОВЕЦЬ, магістр,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## БАГАТОРІВНЕВА МОДЕЛЬ НАЗЕМНИХ І НЕНАЗЕМНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ОПТИЧНОГО БЕЗПРОВОДОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

*Неназемні технології зв'язку стають ключовим компонентом для розвитку майбутніх мереж 6-го покоління (6G). Потенційні можливості, перспективи реалізації, проблеми та їх вирішення для неназемних телекомунікацій залишаються відкритими напрямками для майбутніх досліджень. У статті розглядається використання міліметрового та оптичного діапазонів хвиль у різних конфігураціях багаторівневого космічного зв'язку із застосуванням низькоорбітальних супутників, стратосферних платформ і безпілотних ретрансляторів. Безпроводовий зв'язок у міліметровому та оптичному діапазонах має великий потенціал для використання в космічних системах зв'язку. Такі технології мають переваги застосування в азимутальних каналах прямої видимості перед наземними. Так, наприклад, повне зенітне загасання може бути набагато меншим за погонне в нижніх шарах атмосфери, а також має переваги за віртуальністю реконфігурації, площею покриття і енергетичною (спектральною) ефективністю. Раптове падіння якості зв'язку через атмосферні явища, включно із сильною атмосферною турбулентністю, призводить до потреби в адаптивному динамічному керуванні променем, яке також спричинює зниження використання ресурсів як частотних, так і енергетичних. Безпроводові і волоконні оптичні системи зв'язку мають схожість за робочим діапазоном хвиль, методами оброблення. Методи радіофотоніки можуть бути застосовні і для безпроводових систем зв'язку, де є можливість використання технології конвертації радіохвиль в оптичний, зокрема терагерцовий діапазон. Проведено порівняння смності каналу Шеннона для різних багаторівневих сценаріїв супутникової лінії зв'язку. Проаналізовано напрямки досліджень для забезпечення неперервності зв'язку, адаптації до погодних умов, досягнення пропускної здатності до 100 Гбіт/с.*

**Ключові слова:** неназемні мережі (NTN); 6G; супутниковий зв'язок; безпілотні літальні апарати (БПЛА); стратосферні платформи, мережні космічні конфігурації; міліметрові хвилі; оптичні безпроводові системи; оцінювання ефективності зв'язку.

### ВСТУП

Поширення інтелектуальних пристроїв та безпроводових додатків із вимогою до збільшення якості передавання призводять до необхідності розширення радіочастотної робочої смуги. Поки вирішенням для розгортання мереж наступних поколінь у містах є ущільнення стільникових вузлів із транзитними волоконно-оптичними з'єднаннями високої пропускної здатності. Однак розгортання мереж у малонаселених районах і на великих відстанях із високою пропускною здатністю залишається проблемою. Сьогодні найбільш продуктивними за пропускною здатністю є волоконно-оптичні системи, для яких граничні експериментальні швидкості становлять сотні терабіт за секунду, але ще не дають змоги в глобальному масштабі реалізувати якість технологій 5G і наступних поколінь. Можливим вирішенням цієї проблеми є багаторівнева система зв'язку, яка об'єднує наземні та неназемні системи телекомунікацій. Завдяки технічному прогресу у сфері супутникових технологій нині реалізуються проекти низькоорбітальних систем (LEO). Kuiper від

Amazon, Starlink від SpaceX і OneWeb — це три з основних розроблюваних проєктів угруповань супутників LEO наступного покоління, які обіцяють забезпечити високошвидкісне широкосмугове з'єднання з малою затримкою по всьому світу. У нових проєктах LEO передбачається застосування міліметрового діапазону (ММД) та оптичного діапазону (ОД) [1-5]. Можливість підімкнення до супутникової мережі може бути поліпшено завдяки використанню каналів зв'язку в ММД і ОД між супутниками. Це зумовить збільшення пропускної здатності телекомунікаційних систем, а також можливості ретрансляції даних із супутника спостереження Землі на землю через супутник-ретранслятор GEO, що забезпечує потік даних у реальному часі і зводить до мінімуму кількість наземних станцій, необхідних для надання послуг у системі. Використання ОД і ММД в космосі має ще більший потенціал порівняно з наземними системами, оскільки відсутність фізичного середовища поглинання сигналу дасть змогу отримати високу швидкість передавання інформації.

Сьогодні основну увагу зосереджено на використанні лазерного зв'язку для зв'язку Землі і супутників Землі. Волоконно-оптичні та оптоелектронні технології також розглядаються як ефективне вирішення для реалізації міліметрових технологій зв'язку та у формуванні гібридних оптоелектронних (фотонних) методів напрямленого випромінювання в фазованих антенних решітках. Методи конвертації міліметрового радіочастотного діапазону в оптичний діапазон є перспективним способом збільшення пропускної здатності гібридних волоконно-ефірних наземних систем зв'язку [6-8].

Тому з'явилися напрямки досліджень у сфері об'єднання гетерогенних технологій, включно з наземними безпроводовими, волоконно-оптичними та неназемними (супутниковими, стратосферними, безпілотними) системами зв'язку. Об'єднання таких технологій із використанням міліметрового діапазону хвиль може забезпечити високу пропускну здатність і широкий географічний обхват, незважаючи на дуже великі відстані передавання і сильне загасання на цих частотах. Також дослідникам стало зрозуміло, що для реалізації супутникового інтернету потрібно створити повністю інтегровані неназемні і наземні мережі. Тому буде доцільним проаналізувати можливі варіанти архітектури таких багаторівневих у фізичному плані телекомунікаційних систем, визначити технологічні та фізичні обмеження за площею покриття, пропускну здатністю, іншими параметрами та можливостями.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

### Багаторівнева система зв'язку

#### між наземним і неназемними сегментами

Ідеї створення багаторівневих систем зв'язку між наземним і неназемними сегментами з'явилися завдяки технічному прогресу у сфері створення повітряних і космічних мініатюрних супутникових платформ, що можуть працювати аналогічно наземним базовим станціям. До неназемних платформ належать такі системи (рис. 1):

- ♦ космічні супутники зв'язку, що за висотою орбіти поділяються на низькоорбітальні LEO, середньовисотні (MEO) та геостационарні (GEO);

- ♦ стратосферні платформи HAPs (*High Altitude Platform*), розташовані на висоті 18...25 км (за особливістю атмосфери на цих висотах майже постійна температура та відсутні вітри). Можуть покривати відстані у сотні кілометрів, працювати протягом тривалого часу, але вони також можуть повернутися на землю для реконфігурації. Затримка поширення сигналу 50...85 с значно нижча порівняно з GEO (120 мс), MEO (15...85 мс) і навіть LEO (1,5...3 мс). Стратосферні платформи можуть містити функції Mobile Edge Cloud (MEC), щоб пропонувати наземним терміналам додаткові

обчислювальні можливості та можливості зберігання, у такий спосіб розширюючи охоплення в сторону 3D;

- ♦ низьковисотні платформи (LAPs) або безпілотні літальні апарати (БПЛА, англ. *Unmanned Aerial LAP Vehicle, UAV*), до них належать також прив'язні повітряні кулі. Прогнозується, що БПЛА стануть важливим компонентом для розгортання безпроводових мереж у найближчому майбутньому.

Оптимізації архітектури такої багаторівневої системи також сприяє перехід до програмно-конфігурованих мереж (англ. *Software Defined Networking, SDN*), які в поєднанні з секціонуванням мережі полегшують розгортання і керування мережними функціями віртуалізації (англ. *Virtualization Network Functions, VNF*) на різних фізичних платформах.

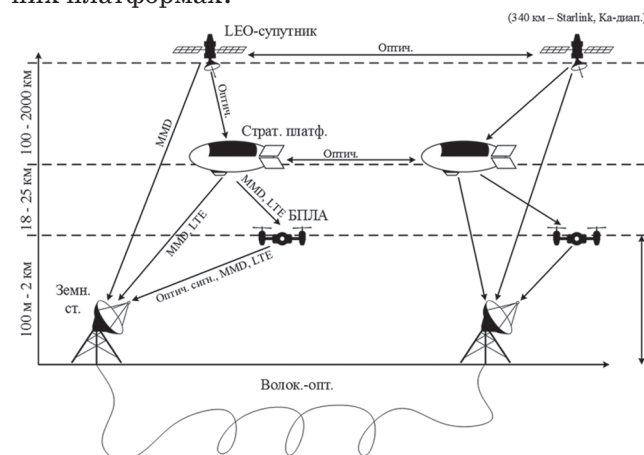


Рис. 1. Архітектура багаторівневого космічного зв'язку з використанням низькоорбітальних супутників, стратосферних платформ та безпілотних ретрансляторів

Така архітектура мережі з використанням програмного керування може забезпечити адаптацію з розподілу частотних ресурсів, потужності і напрямленості антен, швидке реагування на зміну трафіку і динаміку навантаження.

### Застосування оптичного та радіочастотного спектра в багаторівневій структурі мережі

Ключовим вирішенням для підвищення продуктивності безпроводових телекомунікаційних мереж може бути застосування ММД та ОД хвиль, які дають можливість організувати канали передавання з шириною в кілька гігагерц, а пропускну здатність відповідає ширині каналу. Для мобільних систем 5G вирішенням збільшення пропускної здатності є зменшення розміру стільників і збільшення, відповідно, щільності базових станцій. Діапазон 60 ГГц, де спостерігається сильне поглинання в атмосфері, розглядається як варіант для організації мікростільників, оскільки природне поглинання обмежує розмір стільників, підвищуючи спектральну ефективність. У вікні

поглинання 60 ГГц міститься до 7 ГГц частотного ресурсу для розгортання таких мереж.

Іншою перевагою використання високочастотних діапазонів ММД та ОД є можливість створення дуже вузьких напрямлень антен. Оскільки за фізичними закономірностями формування і поширення електромагнітних хвиль зі зменшенням довжини хвилі з'являється можливість зменшення кута розкриття антени. Створення вузьконаправлених випромінювань (для ММД у кілька градусів і навіть часткою одного градуса) пов'язано з можливістю реалізації технології МІМО (*Multiple Input Multiple Output*) багатопроменевого поширення сигналу, що також підвищує продуктивність і енергоефективність таких систем.

Закономірності поширення хвиль ММД та ОД у атмосфері, в космосі, інших середовищах, у міських сценаріях ще вивчаються. Принципи моделювання каналів у міліметровому діапазоні відрізняються від моделей в інших більш низькочастотних радіодіапазонах, наприклад 800 МГц...5 ГГц. Основними особливостями поширення хвиль є слабе підсилення завдяки дифракції, поширення в межах прямої видимості, поглинання в атмосфері (рис. 2), особливо у вікнах поглинання атмосфери. У діапазоні 100 ГГц досліджуються явища перевипромінювання в атмосфері [9].

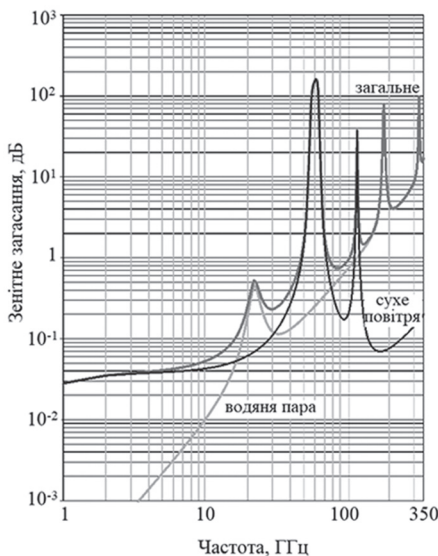


Рис. 2. Загальне зенітне загасання, загасання в сухому повітрі і водяній парі (тиск: 1013,25 гПа; температура: 15° С; густина водяної пари: 7,5 г/м<sup>3</sup>)

Застосування ОД та ММД планується також для використання в неназемних системах зв'язку. Наприклад, у проекті Starlink другим етапом планується виведення понад 7500 апаратів на висоту 340 км, почнуть працювати в V-діапазоні (40...75 ГГц) [10].

Для космічних систем зв'язку, де відсутнє атмосферне поглинання сигналів, оптимальним варіантом є використання ОД (рис. 3).

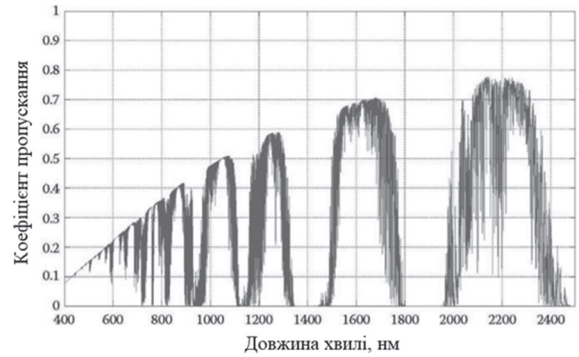


Рис. 3. Коефіцієнт пропускання атмосфери залежно від довжини хвилі

Використання ОД, ММД та низькочастотних класичних діапазонів (300 МГц...24 ГГц) у відкритих системах на різних рівнях неназемної та наземних системах може бути адаптовано під впливом атмосферних збурень і сонячного випромінювання.

Для високих радіочастот ММД спостерігаються різні нелінійні спотворення сигналу, пов'язані з неоднорідністю атмосфери, переважно з нелінійними характеристиками приймально-передатального обладнання. Тому складні багаторівневі методи оброблення інформаційних сигналів, що використовуються, наприклад, у дециметровому діапазоні для підвищення пропускну здатності, не можуть бути застосовні до безпроводових систем у ММД і ОД, особливо на великих відстанях. Нині розробляються нові форми сигналів і схем модуляції, кодування в ММД і ОД. Так, найбільш перспективними для уникнення нелінійних спотворень сигналу розглядаються імпульсні надширококустові методи модуляції, просторове багатопроменеве мультиплексування, методи когнітивного спектра (англ. *Software defined radio, SDR*).

#### Моделювання енергетичного бюджету (потенціалу) каналу супутникового зв'язку

Моделювання енергетичного бюджету (потенціалу) радіоканалу базується на розрахунку втрат у каналі та шумів. Також потрібно зважати на граничні обмеження, пов'язані з фізичними фундаментальними обмеженнями. З підвищенням робочої радіочастоти збільшуються шумові параметри, що обмежує значення вихідної потужності, відстань передавання, пропускну здатність. Застосування оптичного діапазону у відкритих системах та високочастотних радіодіапазонах має особливості, пов'язані з високою напрямленістю випромінювання, поглинанням, поширенням у межах прямої видимості.

Енергетичний потенціал  $PE$  радіоканалу в загальному вигляді визначається верхньою межею різниці між потужністю передавача  $P_{TX}$  та чутливістю приймача  $P_{RX-sens}$ , дБм [11]:



$$P_{TX} - P_{RX-sens} = PE. \quad (1)$$

Чутливість приймача або мінімальна допустима потужність сигналу на вході приймача, зв'язана відношенням [10]:

$$\frac{P_{RX-sens}}{(N_{int} + N_{TX} + N_{RX})} = \frac{P_S}{N}, \quad (2)$$

де  $P_S/N$  — відношення потужності несучої до потужності шуму, необхідне для демодуляції;  $N_{TX}$  — потужність шуму джерела сигналу, яка містить у собі не тільки тепловий шум, а й інші компоненти, пов'язані з методом генерації сигналу;  $N_{RX}$  — втрати потужності сигналу в приймачі;  $N_{int}$  — інтерференційні завади. Сигнал можна відновити належним чином, якщо його потужність на відстані  $d$  від передавальної антени перевищує чутливість приймача, тобто коли  $P_{RX} - P_{RX-sens} \geq 0$ .

Сигнал у радіоканалі між наземною і супутниковою станціями піддається кільком стадіям загасання. Поширення сигналу може здійснюватися в межах прямої видимості (англ. *Line of Sight*, LOS) або поза прямої видимості (англ. *Non Line of Sight*, NLOS) з імовірністю, яка залежить від навколишнього середовища (наприклад, міський чи сільський сценарій) і кута елевації  $\alpha$  супутника. Модель розрахунку втрат  $PL$  у космічному радіоканалі за рекомендаціями 3GPP [12] складається з таких елементів, дБм:

$$PL = PL_e + PL_b + PL_g + PL_s, \quad (3)$$

де  $PL_e$  — втрати на вході в будівлю;  $PL_b$  — основні втрати на трасі;  $PL_g$  — загасання через атмосферні гази;  $PL_s$  — загасання сигналу через іоносферні або тропосферні мерехтіння.

У разі супутникового NLOS каналу зв'язку з внутрішнім наземним терміналом відповідно до 3GPP втрати  $PL_e$  на вході в будівлю розраховуються у вигляді кумулятивної функції розподілу ймовірності  $p$ :

$$PL_e(p) = 10 \log(10^{0,1A} + 10^{0,1B} + 10^{0,1C}), \quad (4)$$

де параметри  $A$ ,  $B$  та  $C$  залежать від несучої частоти  $f_c$ , типу забудови, місця розташування всередині будівлі і руху в будівлі, як описано в [12].

Загасання  $PL_g$  через атмосферні гази описується як функція  $f_c$  несучої частоти, кута розміщення  $\alpha$ , висоти  $h$  орбіти супутника і густини водяної пари (тобто абсолютної вологості). Зокрема, параметр  $PL_g$  обчислюється так:

$$PL_g(\alpha, f_c) = \frac{A_{zenith}(f_c)}{\sin \alpha}. \quad (5)$$

У (5)  $A_{zenith}(f_c)$  являє собою зенітне загасання (тобто загасання в точці безпосередньо над спостерігачем на Землі (рис. 4)), яке зумовлено сухим повітрям (киснем, індукованим тиском азотом і нерезонансним дебаєвським загасанням) і водяною парою.

У рекомендації ITU-R P.676 [13] подано відповідну залежність  $A_{zenith}(f_c)$  для несучих частот від

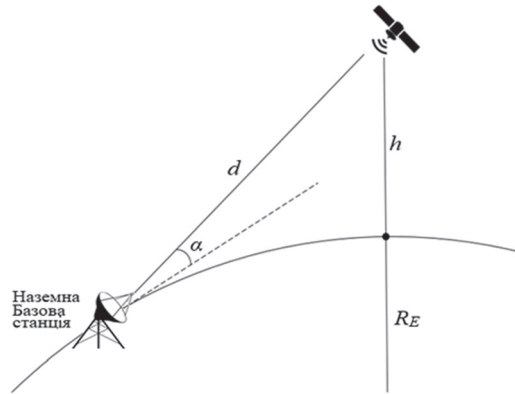


Рис. 4. Концепція передавання сигналу між супутником і наземною станцією ( $BS_E$ ):  $R_E$  — радіус Землі;  $h$  — висота орбіти супутника;  $\alpha$  — кут елевації,  $d$  — відстань між супутником та наземною станцією

1 до 350 ГГц (див. рис. 2), з якої видно, що в нормальних атмосферних умовах  $A_{zenith}(f_c)$  нижча за 10 дБ. На гідрометеорах загасання сигналу обчислюється також різними функціями і параметрами для наземних і супутникових систем.

Слід зазначити, що для супутникових ліній зв'язку максимального впливу на послаблення сигналу завдають найбільш нижні шари атмосфери до 2 км.

Мерехтіння відповідає швидким коливанням амплітуди і фази сигналу. Залежно від несучої частоти іоносферні і/або тропосферні мерехтіння можуть впливати на супутниковий зв'язок. Тобто явища іоносферних (тропосферних) мерехтіннь застосовні тільки для зв'язку в діапазоні, нижчому за 6 ГГц. Тому для звичайних умов на середніх широтах (від  $\pm 20^\circ$  до  $\pm 60^\circ$ ) сильні рівні мерехтіння спостерігаються рідко, і можна прийняти, що  $PL_s = 0$ . Для всіх інших широт відповідно до [12]:

$$PL_s(f_c) = \frac{27,5 \cdot S_4^{1,26} (f_c/4)^{-1,5}}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

де  $S_4$  — індекс мерехтіннь амплітуди [11] і залежить від широти. На низьких широтах (між  $\pm 20^\circ$ , тобто в екваторіальних областях) мерехтіння виникає через великі обсяги збідненої іонізації, створюваної конвективними плазмовими процесами, відповідно  $S_4 = 0 \div 4$ . На високих широтах (вищих за  $\pm 60^\circ$ ) мерехтіння здебільшого походить від краю зовнішнього поясу Ван-Аллена, відповідно  $S_4 = 0 \div 7$ . Вплив тропосферних мерехтіннь у 3GPP характеризується як функція  $PL(f_c, \alpha)$ , на протипагу іоносферним мерехтінням, зростає зі збільшенням частоти несучої сигналу, особливо на частотах, вищих за 10 ГГц. У цьому разі коливання сигналу спричинені раптовими змінами показника заломлення через зміни температури, вмісту водяної пари і барометричного тиску.

Значення  $PL_b$  у формулі (3) визначають відповідно до Стандарту 3GPP TR38.901 [12] втрати у вільному просторі (англ. *Free Space Propagation, FSPL*), тіньове загасання (англ. *ShadowFading, SF*) і втрати через завади (англ. *ClutterLoss, CL*), пов'язані з перевідбиттям сигналу від завад, їх можна подати у вигляді

$$PL_b(d, f_c, \alpha) = FSPL(d, f_c) + SF + CL(\alpha, f_c). \quad (7)$$

Втрати FSPL взято з моделі Фрііса, залежать від несучої частоти  $f_c$ , ГГц, та відстані  $d$

$$FSPL(d, f_c) = 32,45 + 20\log_{10}(f_c) + 20\log_{10}(f_c). \quad (8)$$

Закономірності поширення радіохвиль ММД мають принципові відмінності від поширення в діапазонах, в яких працюють сучасні системи зв'язку 3G і 4G. Розсіювання сигналу ММД відбувається під час відбиття від шорсткуватих бетонних поверхонь будівель, у разі проходження радіохвилі ММД через крони дерев тощо. Побудову емпіричних моделей засновано на пошуку функції, що апроксимує вимірювання, проведені в деякій досліджуваній сфері. Так, еталонним підходом є використання моделі поширення Фрііса, в якій використовується емпіричне співвідношення  $D\lambda^2 = 4\pi A_{\text{eff}}$ , яке вірно для вузькосмугових систем [14]. Тут  $D_{\text{TX}}(\theta)$  — коефіцієнт напрямленої дії антени;  $\theta$  — кут розкриття антени;  $A_{\text{RX}}$  — ефективна площа приймальної антени ( $A_{\text{RX}} = KA_{\text{phys}}$ ,  $0 < K < 1$ ;  $A_{\text{phys}}$  — фізична площа антени). Зі зменшенням довжини хвилі зростає напрямленість антен. Так, для фазованих антенних решіток кутова ширина променя відповідає  $\theta \approx \sqrt{\lambda/Nb}$  [15], де  $N$  — кількість випромінювальних елементів;  $b$  — відстань між цими елементами.

Для високочастотних радіо і оптичних безпроводових систем у майбутніх проектах було б найкращим використання однієї моделі каналу. Порівнянність параметрів підсилення і втрат у каналі дуже близькі як для сигналів у ММД, так і в ОД. Закономірності поширення хвиль ММД мають більш квазіоптичні характеристики поширення порівняно з класичними діапазонами 3G і 4G.

У цій статті пропонується квазіоптична модель, в якій враховуються втрати сигналу, пов'язані з просторовою розбіжністю сигналу:

$$P_{\text{RX}} = P_{\text{TX}} \frac{D_{\text{TX}}(\theta)A_{\text{RX}}}{4\pi d^2} \approx P_{\text{TX}} \frac{4A_{\text{RX}}}{\pi\theta^2 d^2}, \quad (9)$$

де множник  $\frac{4\pi d^2}{D_{\text{TX}}(\theta)}$  визначає втрати сигналу, пов'язані з розбіжністю випромінювання (рис. 5).

Скориставшись (3) і (9), можна дістати, дБ:

$$P_{\text{RX}} = P_{\text{TX}} - PL = P_{\text{TX}} - 10\lg\left(\frac{4\pi d^2}{D_{\text{TX}}A_{\text{RX}}}\right) - SF - CL(\alpha, f_c) - PL_e - PL_g - PL_s. \quad (10)$$

Оскільки в (10)  $d$  подається в метрах як функція

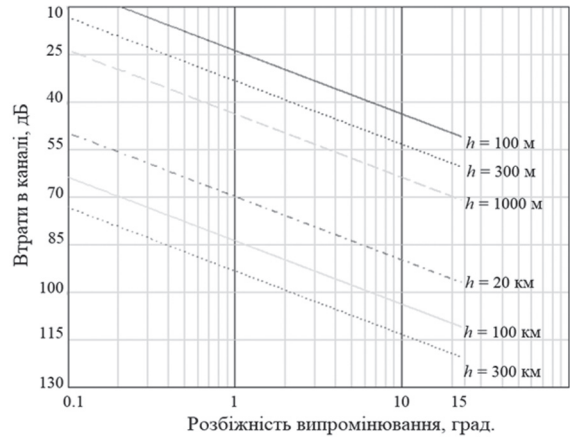


Рис. 5. Залежність кута розкриття антени і втрат потужності сигналу, пов'язаних із розбіжністю випромінювання для різних висот  $h$  розташування супутника

радіуса Землі  $R_E$ , висоти  $h$  орбіти супутника і кутового розташування супутника (кута елевації)  $\alpha$  (рис. 6), то маємо:

$$d = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \alpha + h^2 + 2hR_E} - R_E \sin \alpha. \quad (11)$$

Функція втрат у каналі  $CL(\alpha, f_c)$  моделює послаблення потужності сигналу, спричинене наявними будівлями та об'єктами на землі. Відповідні значення  $CL$  і  $SF$  наведено в 3GPPTR [12] для вихідних кутів місця для різних сценаріїв забудови.

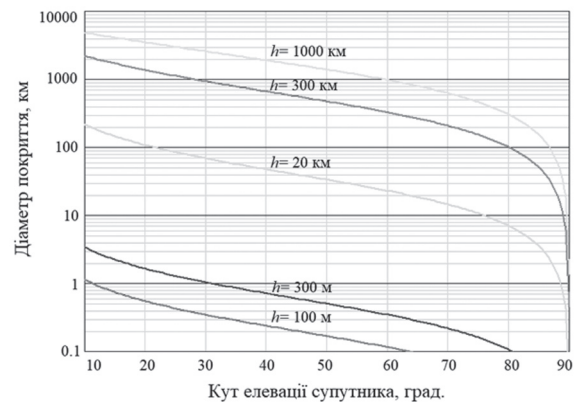


Рис. 6. Залежність кута елевації (місця) супутника від діаметра покриття без урахування рефракції

Для оцінювання взаємозв'язаних величин спектральної, енергетичної ємності, пропускну здатності зазвичай за основу береться рівняння Шеннона:

$$C = B \log_2(1 + SNR), \quad (12)$$

де відношення сигнал/шум  $SNR$  визначається відповідно до (2) як  $SNR = P_{\text{RX}} / (N_{\text{int}} + N_{\text{TX}} + N_{\text{RX}})$ .

Припускаємо, що якщо відношення SNR нижче попередньо визначеного порога 0 дБ, то зв'язок Земля–супутник не може бути встановлений, і в цьому разі ми визначаємо пропускну здатність Шеннона такою, що дорівнює 0.

Спектр, нижчий за 6 ГГц, пропонує обмежену ємність (т. ч. < 500 Мбіт/с), що може бути недостатньо для нових додатків і технологій.

Продуктивність мереж можна збільшити, скориставшись частотними ресурсами ММД і ОД, які також пов'язані з підсиленням напрямленості (понад 50 дБ, що є типовим для сучасних супутникових антенних технологій). Розбіжність пучка світла сучасного лазера може досягати 10 мкрад. Також відомо, що для високочастотних технологій зі зростанням потужності передавача зростає потужність шуму. Ця тема аналізується, наприклад у роботах [6-8], і має велику інформаційну та обчислювальну ємність. У даній роботі це питання не досліджується.

**Порівняння за ефективністю різних конфігурацій багаторівневої супутникової системи зв'язку між наземним і неназемними сегментами**

Особливості структури атмосфери і переваги супутникових технологій дають змогу застосовувати багаторівневі висотні моделі, за допомогою яких можна збільшити пропускну здатність. Можливості підвищення продуктивності завдяки багаторівневим висотним системам зв'язку базуються на таких факторах:

◆ використання в одному тракті ММД, ОД, діапазонів LTE, волоконно-оптичних ліній залежно від структури атмосфери, погодних умов, територіального розташування;

◆ у стратосферних платформах і БПЛА передбачається підсилення потужності сигналу завдяки використанню сонячної енергії, збільшенню напрямленості (підсилення) антени, застосуванню технології MIMO;

◆ космічна (бортова) станція може виробляти фільтрацію і перетворення радіочастот, демодуляцію/декодування, перемикування/маршрутизацію, кодування/модуляцію.

Середня пропускну здатність відкритих наземних оптичних систем 2 Гбіт/с. Однак із вдосконаленням методів оптоелектронного оброблення сигналів швидкість передавання може зрости до сотні (і більше) гігабіт за секунду.

Розглянемо низхідний канал від супутника до земної станції. Параметри для моделювання пропускну здатності Шеннона наведено в таблиці.

Оптичний космічний зв'язок на лініях Земля-супутник і між супутниками вже давно успішно використовується [16-18]. Сучасні досягнення

Параметри моделювання

Параметр	Значення				
Кут піднесення супутника, град.	10, ..., 90 град.				
Висота LEO супутника	2000...300 км				
НАPs	20 км				
БПЛА	1 км...100 м				
Несуча частота $f_c$	2 ГГц	6 ГГц	28 ГГц	70 ГГц	0,36 ГГц
Ширина каналу $B$	200 МГц	500 МГц	1 ГГц	3 ГГц	100 ГГц
Кут розкриття антени (ширина променя)	5 град.	3 град.	0,5 град.	0,3 град.	$6,7 \times 10^{-4}$ град.
Потужність передавача ММД	33 дБм				
Площа апертури приймальної антени наземної базової станції	3 м <sup>2</sup>	3 м <sup>2</sup>	1,5 м <sup>2</sup>	1,5 м <sup>2</sup>	0,2 м <sup>2</sup>
Площа апертури приймальної антени супутника НАPs, БПЛА	$0,5^{-1}$ м <sup>2</sup>	$0,5^{-1}$ м <sup>2</sup>	$0,5^{-1}$ м <sup>2</sup>	$0,5^{-1}$ м <sup>2</sup>	0,2 м <sup>2</sup>
Поріг відношення сигнал/шум	0 дБ				
Метод модуляції сигналу	OOK, PPM				
Відстань між наземною базовою станцією (BSE) і користувачем для міського сценарію	200 м, 100 м				
Широта	35°				
Радіус Землі $R_E$	6371 км				
Температура $T$	288,15 К				
Концентрація водяної пари	7,5 г/м <sup>3</sup>				
Тиск повітря	1013,25 гПа				
Варіанти розбивки траси на сегменти	Один сегмент (1000 км, 300 км): Супутник – Земна станція 2 ГГц, 6 ГГц, 28 ГГц, 70 ГГц				
	Два сегменти: Супутник (300 км) – НАPs (20 км) – Земля				
	Три сегменти: Супутник (300 км) – НАPs (20 км) – LAPs (100 м) – Земля				
	Чотири сегменти: Супутник – НАPs – LAPs (2 км) – LAPs (100 м) – Земля				

в галузі космічних технологій та фотонних технологій відкривають нову главу для оптичного космічного зв'язку. Пропускна здатність оптичного каналу сприяє зменшенню часу затримки сигналу і підтримці режиму в реальному часі, що потрібно для багатьох важливих додатків. Але незважаючи на великий потенціал FSO-зв'язку (*free-space optics*), його продуктивність обмежена побічними ефектами (зокрема поглинанням, розсіюванням і турбулентністю) атмосферного каналу, які роблять канал випадковою функцією простору і часу.

З цієї причини в FSO необхідно відстеження і дуже точне наведення оптичного випромінювання до одержувача. Для системи FSO за ясних погодних умов видимість може досягти значення понад 10 миль.

Експериментальні результати [19] продемонстрували для низхідного каналу зв'язку супутник-Земля FSO пропускну здатність до 1,25 Гбіт/с, а також і для HAP-HAP до 10 Гбіт/с. Передбачається, що з удосконаленням схем модуляції пропускна здатність безпроводової мережі FSO може бути збільшена навіть до 100 Гбіт/с. Споживана потужність бортових антен супутників становить, як передбачається, від 0,5 до 5 Вт залежно від швидкості передавання даних на відстань до кількох тисяч кілометрів [19]. Системи MIMO FSO можуть також значно збільшити продуктивність.

Розрахунки інформаційної ємності Шеннона для багаторівневих за висотою розташування супутників (HAP, UAV) зображено на рис. 7-9.

Проміжний HAP (UAV) забезпечує підвищену пропускну здатність через підсилення сигналу від висхідного супутника перед його пересиланням на землю, забезпечуючи при цьому більш швидке розгортання і менші витрати порівняно з космічними станціями. На рис. 7-9 також наведено порівняльну характеристику роботи багаторівневих систем у вікнах прозорості атмосфери 28...52 ГГц, 70...80 ГГц і в ОД.

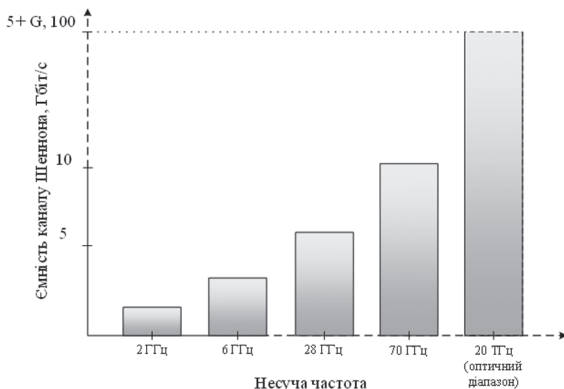


Рис. 7. Порівняльна характеристика ємності каналу Шеннона для супутникової лінії LEO-Земля на різних радіо- та оптичному діапазонах

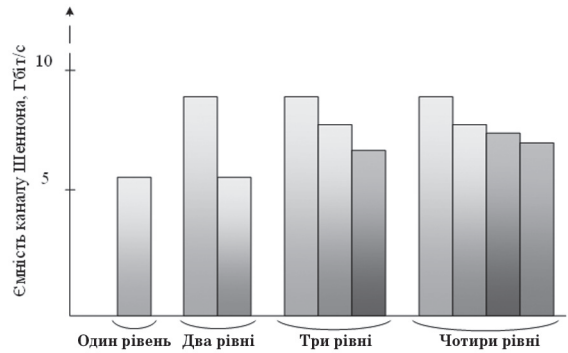


Рис. 8. Порівняльна характеристика ємності каналу Шеннона для багаторівневого сценарію супутникової лінії зв'язку, що працює в діапазоні 28 ГГц: один рівень LEO-BS<sub>E</sub> (земна базова станція); два рівні LEO-HAP-BS<sub>E</sub>; три рівні LEO-HAP-UAV-BS<sub>E</sub>; чотири рівні LEO-HAP-UAV1 (1 км)-UAV2 (100 м)-BS<sub>E</sub>

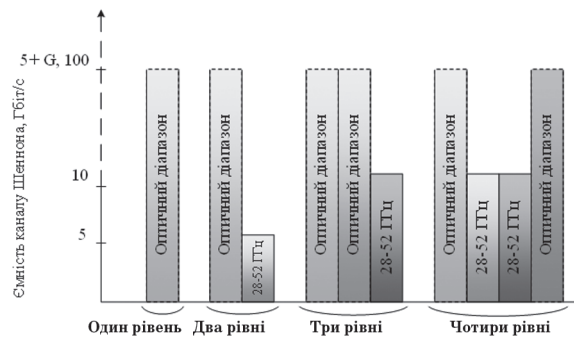


Рис. 9. Порівняльне уявлення ємності каналу Шеннона для багаторівневого сценарію супутникової лінії зв'язку: один рівень LEO-BSE (земна базова станція); два рівні LEO-HAP-BSE; три рівні LEO-HAP-UAV-BSE; чотири рівні LEO-HAP-UAV1 (1 км)-UAV2 (100 м)-BSE на різних радіо- та оптичному діапазонах

### Перспективи впровадження проведеного дослідження

Безпроводовий зв'язок у ММД і ОД має великий потенціал для використання в космічних системах зв'язку. Дані технології мають переваги застосування в азимутальних каналах прямої видимості порівняно з наземними. Так, наприклад, повне зенітне загасання може бути набагато меншим за погонний у нижніх шарах атмосфери. А також має переваги за віртуальністю реконфігурації, площею покриття і енергетичною (спектральною) ефективністю. Раптове падіння якості зв'язку через атмосферні явища, включно із сильною атмосферою турбулентністю, призводить до необхідності адаптивного динамічного керування променем, яке також зумовлює зниження використання ресурсів як частотних, так і енергетичних. Безпроводові і волоконні оптичні системи зв'язку мають схожість за робочим діапазоном хвиль, методами оброблення. Методи радіофотоники можуть бути застосовані і для безпроводових



систем зв'язку, де може бути використана технологія конвертації радіохвиль в оптичний, зокрема терагерцовий діапазон.

Гібридне використання ММД і ОД у системах космічного зв'язку, багаторівневої конфігурації розташування супутникових ретрансляторів, включно з НАР іUAV та волоконно-оптичними лініями, у новітніх методах оброблення сигналів можуть забезпечити високошвидкісний зв'язок практично в будь-яку погоду в будь-якій точці Землі. Реалізація високошвидкісних радіоліній багато в чому пов'язана з досягненнями галузі фотоніки. Наприклад, оптоелектронні методи формування випромінювання в фазованих антенних решітках, використання перспективних форматів модуляції, таких як КАМ високого порядку, імпульсних методів модуляції оптичного сигналу з поляризаційним ефектом, технологій МІМО ФАР, методів спостереження.

### ВИСНОВКИ

Неназемні мережі досліджуються як ключовий компонент структури 6G для підтримання глобального, повсюдного і неперервного підімкнення, а також для подолання обмежень покриття розгорнутих мереж 5G.

Запропонована в роботі система багаторівневої інтегрованої архітектури космічного зв'язку може бути розглянута для мереж 5G+. Спільне використання радіо- і оптичного спектра, рухомих архітектур мережі з ретрансляторами на різних висотах для адаптації погодних умов, необхідної пропускної здатності тощо сприяє підвищенню пропускної здатності в сотні гігабіт за секунду. У межах майбутніх робіт необхідно об'єднати принципи, параметри земних і неназемних телекомунікацій, методи модуляції/мультиплексування, часу затримки і покриття.

### Список використаної літератури

1. **Kaushal H., Kaddoum G.** *Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques* // *IEEE Communications Surveys & Tutorials, Firstquarter 2017. Vol. 19, no. 1. P. 57–96.*
2. **Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies** / M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla [et al.] // *IEEE Communications Magazine. Mar. 2020. Vol. 58, no. 3. P. 55–61.*
3. **Nanosatellite-5G Integration in the Millimeter Wave Domain: A Full Top-Down Approach** / F. Babich, M. Comisso, A. Cuttin [et al.] // *IEEE Transactions on Mobile Computing, Feb. 2020. Vol. 19, no. 2. P. 390–404.*
4. **Khalighi M. A., Uysal M.** *Survey on free space optical communication: A communication theory perspective* // *IEEE Comm. Surv. & Tut., 2014. Vol. 16, no. 4. P. 2231–2258.*

5. **Giordani M., Zorzi M.** *Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities* // *IEEE Network, Mar. 2021. Vol. 35, no. 2. P. 244–251.*

6. **Yu J., Li X., Zhou W.** *Tutorial: Broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication* // *APL Photon. 2018. Vol. 3, no. 11.*

7. **Jia S.** *THz photonic wireless links with 16-QAM modulation in the 375-450 GHz band* // *Opt. Express, 2016. Vol. 24, no. 21. P. 23777–23783.*

8. **W-band technology and techniques for analog millimeter-wave photonics** / V. J. Urick, C. S. Sunderman, J. F. Diehl, N. D. Peterson // *Naval Res. Lab., Washington, DC, USA, Aug. 2015.*

9. **Interference and SINR in millimeter wave and terahertz communication systems with blocking and directional antennas** / V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov [et al.] // *IEEE Trans. Wireless Commun., Mar. 2017. Vol. 16, no. 3. P. 1791–1808.*

10. **Loughran J.** *Starlink launches 60 more satellites but commercial service faces delays* [Електронний ресурс] // *IET Engineering and Technology. URL:*

<https://eandt.theiet.org/content/articles/2020/11/starlink-launches-60-more-satellites-but-commercial-service-faces-delays/>

11. **Физические аспекты моделирования радиоканала и шумов в миллиметровом диапазоне** / Я. А. Кременецкая, Е. Р. Жукова, Н. В. Градобоева [и др.] // *Телекоммуникаційні та інформаційні технології. 2018. № 2. С. 60–71.*

12. **3GPP. Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN)** // *TR 38.821 (Release 16), 2020.*

13. **Рек. МСЭ-R P.676-6** [Електронний ресурс] // *MCE. URL:*

[https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf)

14. **Долуханов М. П.** *Распространение радиоволн: учеб. для вузов. Москва. Связь, 1972.*

15. **Хансен Р. С.** *Фазированные антенные решетки, 2-е изд. Москва: Техносфера, 2012.*

16. **Earth to space laser beam transmission for spacecraft attitude measurement** / T. Aruga, K. Araki, T. Igarashi [et al.] // *Appl. Opt., 1984. Vol. 23. P. 114–147.*

17. **Earth-to-geosynchronous satellite laser beam transmission** / T. Aruga, K. Araki, R. Hayashi [et al.] // *Appl. Opt., 1985. Vol. 24, no. 1. P. 53–56.*

18. **Experiments on CO2 laser beam transmission from ground to geostationary meteor** / K. Araki, T. Itabe, M. Takabe [et al.] // *Laser Sensing Symposium, 1988. P. 47–48.*

19. **Kaushal H., Kaddoum G.** *Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques* // *IEEE Commun. Surv. Tutorials 2017. 19(1). P. 57–96 ( ).*



Я. А. Кременецкая, А. А. Макаренко, Н. В. Руденко, А. В. Березнюк, С. Г. Лазебный, В. П. Яковец

**МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ НАЗЕМНЫХ И НЕНАЗЕМНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ОПТИЧЕСКОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ**

*Неназемные технологии связи станут ключевым компонентом для развития будущих сетей 6-го поколения (6G). Потенциальные возможности, перспективы реализации, проблемы и их решения для неназемных телекоммуникаций остаются открытыми направлениями для будущих исследований. В статье рассматривается использование миллиметрового и оптического диапазонов волн в различных конфигурациях многоуровневой космической связи с применением низкоорбитальных спутников, стратосферных платформ и беспилотных ретрансляторов. Беспроводная связь в ММД и ОД имеет большой потенциал для использования в космических системах связи. Данные технологии имеют преимущества применения по азимутальным каналам прямой видимости по сравнению с наземными. Так, например, полное зенитное затухание может быть гораздо меньшим, чем погонное в нижних слоях атмосферы. А также имеет преимущества по виртуальности реконфигурации, площади покрытия и энергетической (спектральной) эффективности. Внезапное падение качества связи из-за атмосферных явлений, включая сильную атмосферную турбулентность, приводит к необходимости адаптивного динамического управления лучом, которое также приводит к снижению использования ресурсов как частотных, так и энергетических. Беспроводные и волоконные оптические системы связи имеют сходство по рабочему диапазону волн, методам обработки. Методы радиофотоники могут быть применены и для беспроводных систем связи, где может быть использована технология конвертации радиоволн в оптический, включая терагерцовый диапазон. Проведено сравнение емкости канала Шеннона для различных многоуровневых сценариев спутниковой линии связи. Проанализированы направления исследований для обеспечения непрерывности связи, адаптации к погодным условиям, достижения пропускной способности до 100 Гбит/с.*

**Ключевые слова:** неназемная сеть (NTN); 6G; спутниковая связь; беспилотные летательные аппараты (БПЛА); стратосферные платформы; сетевые космические конфигурации; миллиметровые волны; оптические беспроводные системы; оценка эффективности связи.

Ya. A. Kremenetska, A. O. Makarenko, N. V. Rudenko, A. V. Bereznyuk, S. H. Lazebnyi, V. P. Yakovets

**MULTI-LEVEL MODEL OF TERRESTRIAL AND NON-TERRESTRIAL TELECOMMUNICATIONS  
USING OPTICAL WIRELESS TECHNOLOGIES**

*Non-terrestrial communication technologies will become a key component for the development of future 6th generation (6G) networks. Potentials, implementation prospects, problems and solutions for non-terrestrial telecommunications remain open areas for future research. The article discusses the use of millimeter and optical wavelengths in various configurations of multilevel space communications using LEO satellites, stratospheric platforms and unmanned repeaters. Wireless communication in MMW and OR has great potential for use in space communication systems. These technologies have the advantages of using azimuth line-of-sight channels in comparison with terrestrial ones. For example, the total zenith attenuation can be much less than the linear attenuation in the lower atmosphere. It also has advantages in terms of reconfiguration virtuality, coverage area and energy (spectral) efficiency. A sudden drop in communication quality due to atmospheric phenomena, including severe atmospheric turbulence, leads to the need for adaptive dynamic beam steering, which also leads to a decrease in the use of resources, both frequency and energy. Wireless and fiber optic communication systems have similarities in the operating wavelength range, processing methods. The methods of radio-photonics can be applied to wireless communication systems, where the technology of converting radio waves into optical, including the terahertz range, can be used. The comparison of the capacity of the Shannon channel for various multi-level scenarios of the satellite communication line is carried out. The directions of research to ensure the continuity of communication, adaptation to weather conditions, and the achievement of throughput up to 100 Gbit/s are analyzed.*

**Keywords:** non-terrestrial network (NTN); 6G; satellite connection; unmanned aerial vehicles (UAVs); stratospheric platforms; space network configurations; millimeter waves; optical wireless systems; communication efficiency assessment.

