

УДК 004.7:004.9

DOI: 10.31673/2786-8362.2024.024589

Макаренко А.О., д.т.н.; Яковець В.П.,  
Блаженний Н.В., PhD; Горохов О.С.

## БЮДЖЕТ КАНАЛУ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ СТІЛЬНИКОВО-СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

**Makarenko A.O., Yakovets V.P., Blazhennyi B.V., Horokhov O.S. Channel budget of an integrated cellular-satellite communication system.** This paper is devoted to the study of the effects that lead to losses in the communication channel between a ground user and a satellite in an integrated satellite-cellular communication system. The communication channel parameters are considered in the scenario of integrating satellite systems operating in low-Earth orbit (LEO) with fourth-generation cellular networks to provide coverage for the maximum possible number of users. The paper investigates the effects of small-scale and large-scale fading, Doppler shift and other problems that may arise when designing a multi-level telecommunication system. The theoretical parameters of the channel budget necessary to ensure stable communication between the satellite and a conventional mobile station are presented. Among the problems arising in the design of the system, attention is paid to signal synchronization due to constant relative motion between satellites in orbit and ground terminals, inter-satellite communication channels requiring increased computing power of the onboard equipment installed on the satellite, and satellite handover.

**Keywords:** Satellite networks, 4G, LEO

**Макаренко А.О., Яковець В.П., Блаженний Н.В., Горохов О.С. Бюджет каналу інтегрованої системи стільниково-супутникового зв'язку.** Стаття присвячена дослідженню ефектів, що приводять до втрат в каналі зв'язку між наземним користувачем та супутником в інтегрованій супутниково-стільниковій системі зв'язку. Розглядається параметри каналу зв'язку при сценарії інтеграції супутникових систем, що працюють на низькій навколоземній орбіті (LEO) з стільниковими мережами четвертого покоління, для забезпечення покриттям максимально можливої кількості користувачів. В статті досліджені ефекти маломасштабного та великомасштабного завмирання, доплерівський зсув та інші проблеми, що можуть виникати при проектуванні багаторівневої телекомунікаційної системи. Представлені теоретичні параметри бюджету каналу, необхідні для забезпечення стабільного зв'язку між супутником та звичайною мобільною станцією. Серед проблем, що можуть виникати при проектуванні системи, приділена увага синхронізації сигналів у зв'язку з постійним відносним рухом між супутниками на орбіті та наземними терміналами, міжсупутниковим каналам зв'язку, що потребують збільшення обчислювальної здатності бортового обладнання, яке встановлюється на супутник, та супутниковий хендовер.

**Ключові слова:** 4G, супутникові мережі, LEO

### Вступ

Інтеграція стільникових та супутникових систем зв'язку це перспективний напрямок розвитку телекомунікаційних технологій, що набирає все більшу і більшу розповсюдженість. Супутникова система, що дозволяє прямий та зворотній зв'язок безпосередньо з мобільними станціями, вирішує низку проблем, що постають у районах з недостатнім покриттям. Для інтеграції неназемних і наземних мереж обираються стільникові мережі четвертого та п'ятого покоління та супутникові системи, що працюють на низькій навколоземній орбіті (LEO), завдяки низькій затримці [1]. У статті розглядається проблематика бюджету каналу зв'язку такої інтегрованої системи та теоретичні способи їх вирішення. Серед проблем розглядаються синхронізація супутникової передачі, забезпечення роботи міжсупутникових каналів зв'язку, атмосферне загасання, доплерівський зсув та перемикання променя.

LEO-супутникові системи знаходять все більше розповсюдження завдяки зростаючому попиту та технологіям, що дозволяють багаторазове виведення супутників на орбіту, зменшуючи таким чином вартість первинної підготовки системи до роботи. В порівнянні з попередніми поколіннями низькоорбітальних супутникових систем, новітні LEO-угруповання мають набагато більш високу продуктивність завдяки використанню цифрового комунікацій-

ного навантаження, удосконалених схем модуляції, багатопроменевих антен та більш складних схем повторного використання частот [10].

Інтеграція супутникових та наземних мереж привернула значну увагу з боку органів стандартизації, операторів мобільних мереж, супутникової промисловості та дослідницької спільноти, всі з яких зацікавлені у розробці єдиної безпроводової мережі. У цьому контексті супутники націлені на те, щоб стати частиною як мереж доступу, так і транспортних мереж у системах, які називаються неназемними мережами (Non-Terrestrial Network – NTN). Неназемна мережа – це технологія прямого зв'язку термінал-супутник, заснована на технології нового радіо (New Radio – NR), розробленої 3GPP в R17, що є важливим доповненням до технології наземного стільникового зв'язку. Завдяки інтеграції супутникових мереж зв'язку та наземних мереж 5G, NTN може забезпечити повсюдне покриття без обмежень за рельєфом місцевості, а також з'єднати небо, землю, море та інші простори, щоб сформувати інтегровану мережу повсюдного доступу, яка забезпечує доступ на вимогу у всіх сценаріях [3].

**Аналіз останніх досліджень.** В [11] описується інтеграція супутникових систем та стільникових систем п'ятого покоління. В запропонованій архітектурі супутникові приймачі будуть спрямовані на систему LEO, яка буде пов'язана із системами 5G або базовими станціями, використовуючи безліч низхідних каналів супутникового зв'язку. Нова система зможе підтримувати всі користувальницькі сервіси та програми.

В [6, 7, 9, 12] розглядаються сценарії інтеграції супутникових мереж з стільниковими мережами четвертого покоління, зокрема LTE. Серед викликів розглядається доплерівський зсув, перевикористання частот та висока затримка.

В підтвердження зростаючого попиту неназемних мереж варто привести останнє оновлення функціоналу супутникового угруповання Starlink. На даний момент в тестовому режимі на орбіту виведено близько десяти супутників, що використовують технологію Direct to Cell. Технологія Direct to Cell забезпечує покриття для користувачів LTE з використанням супутникової інфраструктури Starlink. Технологія не передбачає необхідність попередньої модернізації LTE-телефонів для повноцінної роботи Direct to Cell. Завдяки цьому можна забезпечити покриття в регіонах, де неможлива повноцінна підтримка традиційного стільникового зв'язку. В [2] розглядаються параметри продуктивності Starlink. В роботі Liu et al [4] розглядаються регуляторні виклики Direct to Cell та представлений метод їх подолання шляхом впровадження стандарту MOSAIC.

**Постановка завдання.** Незважаючи на зусилля 3GPP, пов'язані з впровадженням стандарту NTN, що пов'язує супутниковий зв'язок та стільникові системи п'ятого покоління, мобільний зв'язок стандарту 4G на даний момент є більш широко впровадженим, тому зосередження зусиль на інтеграції супутникових систем та LTE дозволить підключити набагато більше потенційних користувачів [8]. Супутниковий зв'язок може доповнювати технологію 4G та підвищувати ефективність стільникових систем, вирішуючи проблеми покриття та складні варіанти використання через обмеження інфраструктури. Такі інтегровані супутниково-стільникові системи мають низку проблем, викликаних великими відстанями, швидким переміщенням супутників і аспектами супутникового зв'язку, таких як велике доплерівське відхилення частоти, велике загасання і велика затримка сигналу.

Наші висновки будуть опиратись на реальні дані супутникового угруповання Starlink, що працює на орбіті LEO та практичні параметри систем з доповідей 3GPP. У наземних мережах вежі стільникового зв'язку нерухомі, але в супутниковій мережі, зокрема Starlink, вони рухаються зі швидкістю десятків тисяч кілометрів на годину відносно користувачів Землі. Крім того, це мотивує використання більш високих спектральних діапазонів для розширення смуги пропускання та зниження навантаження спектру, наприклад, діапазонів Ku та Ka і навіть діапазонів Q/V. Однак такі високочастотні діапазони та швидкий відносний рух між супутником та користувачем призводять до екстремальних доплерівських зсувів. Також, сучасні системи все більше покладаються на широкосмугову форму сигналу OFDM для надання спектрально ефективних та широкосмугових послуг, де OFDM за своєю природою є чутливим до доплерівських зрушень. Мобільні телефони також неймовірно складно

підключати до супутників, що знаходяться на відстані в сотні кілометрів, враховуючи низький коефіцієнт посилення антени та потужність передачі мобільного телефону.

**Метою роботи** є аналіз каналу зв'язку інтегрованої супутниково-стільникової системи, зокрема дослідження ефекту Доплера, завмирання та інших параметрів бюджету каналу. Розуміння очікуваного діапазону доплерівського зсуву має першорядне значення для надання розробникам інформації про розробку більш точних контурів фазового стеження, встановлення меж виявлення сигналу та аналізу загального несприятливого впливу на сигнали зв'язку.

### Виклад основного матеріалу дослідження.

Інтеграція супутникових та наземних мереж буде цінною для багатьох застосувань, але пряме підключення для мобільних пристроїв вважається основним цільовим варіантом використання. Це пов'язано з тим, що одним з ключових аспектів узгодженої роботи наземних і неназемних мереж є використання уніфікованого терміналу користувача (UT – User Terminal), який працює для обох мереж і може легко перемикається між ними. Такий уніфікований термінал може забезпечити такі варіанти використання, як розвантаження, балансування навантаження та стійкі до відмови мережні додатки. Крім того, пряме підключення для мобільних пристроїв (в тому числі і до непристосованих смартфонів) є переконливим бізнес-кейсом для супутникових операторів через велику кількість клієнтів для цієї послуги порівняно з терміналами з дуже малою апертурою (VSAT – Very Small Aperture Terminal). Більше того, це розширює передові послуги стільникових мереж по всьому світу без необхідності додаткової наземної інфраструктури.

Підтримка портативних пристроїв розпочалася із супутникових телефонів, які використовували великі антени для голосового зв'язку. Також було проведено кілька демонстрацій підтримки служби коротких повідомлень для непристосованих для супутникових мереж смартфонів. Однак підтримка широкосмугових послуг для непристосованих мобільних пристроїв є особливо складною через проблеми з бюджетом каналу зв'язку, навіть при використанні низькоорбітальних LEO-супутників.

Кругові або майже кругові орбіти є домінуючими типами для LEO-угруповань, оскільки вони забезпечують послідовну висоту втрат на шляху до супутника. Можна вважати, що супутникове угруповання існує в уявній сферичній оболонці з радіусом  $a = h + R_e$ , де  $h$  – висота над середнім рівнем моря, а  $R_e$  – середній радіус Землі. На круговій орбіті кутова швидкість супутника стала і визначається виразом  $\omega = \sqrt{\mu/a^3}$ , де  $\mu$  – стандартний гравітаційний параметр Землі. Супутник завжди матиме зенітний кут  $\varphi \leq \varphi_{\max}$  щодо Землі, щоб він міг встановити з'єднання з терміналом користувача, оскільки кривизна Землі вимагає прямої видимості між супутником та терміналом користувача. Два фактори визначають  $\varphi_{\max}$ : кривизна Землі та ширина променя антени  $\psi$  супутника, коли вона є обмежуючим фактором.

**Атмосферне загасання.** Для розрахунку великомасштабного завмирання між UT  $k$  та супутником  $m$  ми використовуємо наступний вираз:

$$L_{m,k} = 10^{-(L_{m,k}^{\text{розп}}[\text{dB}] + L_{m,k}^{\text{затін}}[\text{dB}] + L_{m,k}^{\text{ант}}[\text{dB}] + L_{m,k}^{\text{інш}}[\text{dB}])/10}, \quad (1)$$

де:  $L_{m,k}^{\text{розп}}[\text{dB}]$  – втрати на шляху, в яких враховується розповсюдження у вільному просторі та можуть бути розраховані як:

$$L_{m,k}^{\text{розп}}[\text{dB}] = 32.45 + 20 \log_{10} f_c + 20 \log_{10} d_{m,k}, \quad (2)$$

де  $f_c$  – несуча частота, ГГц, а  $d_{m,k}$  – відстань поділу (в метрах).

$L_{m,k}^{\text{затін}}[\text{dB}]$  – втрати від затінення.

$L_{m,k}^{\text{ант}}[\text{dB}]$  – це втрати посилення антени через кут UT щодо кута візування основного променя антени супутника, що розраховуються наступним чином:

$$L_{m,k}^{\text{ант}}[\text{dB}] = -10 \log_{10} \left( 4 \left| \frac{J_1(2\pi \eta \sin \omega_{m,k})}{2\pi \sin \omega_{m,k}} \right|^2 \right), \quad (3)$$

де  $\eta$  – радіус апертури антени в довжині хвилі,  $J_1(\cdot)$  – функція Бесселя першого роду і першого порядку, а  $m$  – кут від лінії візування.

$L_{m,k}^{\text{інш}}$  [dB] представляє інші великомасштабні втрати, такі як загасання в атмосферних газах, та іоносферне або тропосферне (залежно від використовуваної смуги спектру) мерехтіння.

У випадку маломасштабного завмирання ми припускаємо, що умови каналу статичні протягом інтервалу часу когерентності з вибірок  $\tau_c$  (використань каналу). Канали між супутниками та УТ складаються з компонентів LoS (Line of Sight – пряма видимість) та NLoS (non-Line of Sight – непряма видимість), де ймовірність LoS збільшується зі збільшенням кута місця (тобто максимуму при куті місця 90). Канал між  $k$ -им УТ та  $m$ -им супутником можна розрахувати по райсівському розподілу наступним чином:

$$h_{m,k} = \sqrt{L_{m,k}} \left( \sqrt{\frac{\kappa_{m,k}}{\kappa_{m,k}+1}} e^{j\phi_{m,k}} + \sqrt{\frac{1}{\kappa_{m,k}+1}} h'_{m,k} \right), \quad (4)$$

де два доданки представляють компоненти LoS і NLoS відповідно, а  $\kappa_{m,k}$  – райсівський К-фактор, який є відношенням потужностей LoS до NLoS. Припускається, що компонент NLoS – це завмирання Релея, тобто  $h'_{m,k} \sim CN(0, 1)$ , а фаза компонента LoS дорівнює  $\phi_{m,k}$ , яка є рівномірною випадковою величиною, тобто  $\phi_{m,k} \sim U[-\pi, \pi]$ . Через відносний рух між супутниками та УТ доплерівський зсув компенсується в процесі синхронізації.

**Доплерівський зсув.** Оскільки супутники LEO працюють на низьковисотних орбітах, їм доводиться рухатися з високою швидкістю, що змінює частоту сигналу приймача, а саме ефект Доплера. Коли передавач та приймач наближаються один до одного, частота збільшується; і навпаки, коли вони віддаляються один від одного, частота зменшується. Значні зміни частоти збільшують складність демодуляції приймачем і погіршують якість зв'язку.

Для вузькосмугового носія  $f_0$  і відносної швидкості  $v$  класичний зсув Доплера визначається як  $f_d = -v/c \times f_0$ , де  $c$  – швидкість світла. Для узагальнення результатів ми будемо використовувати концепцію нормалізованого зсуву Доплера,

$$v = \frac{f_d}{f_0} = \frac{-v}{c}, \quad (5)$$

У відповідності до цієї концепції, нормалізований зсув Доплера є безрозмірною величиною, і фактичний зсув дорівнює  $f_d = f_0 v$ . Оскільки швидкість може бути знайдена шляхом диференціювання відстані, тобто  $v = dp/dt$ , нормалізований зсув дорівнює:

$$v(t, \varphi_0) = -\frac{a\omega R_e}{c} \frac{\cos \varphi_0 \sin \omega t}{\sqrt{a^2 + R_e^2 - 2aR_e \cos \varphi_0 \cos \omega t}}, \quad (6)$$

Максимальний доплерівський зсув відбувається, якщо супутник знаходиться праворуч на краях дуги прольоту. В цьому випадку супутник знаходиться у положенні, заданому формулою  $\omega t = \pm \zeta/2$ .

Межі нормалізованого доплерівського зсуву:

$$v_{\max}(\varphi_0) = \pm \frac{\omega R_e}{c} \sqrt{\frac{a^2 \cos^2 \varphi_0 - R_e^2}{a^2 - R_e^2}}, \quad (7)$$

який залежить від заданого кута зеніту найближчого зближення  $\varphi_0$ . Найбільший доплерівський зсув, який може виникнути, збігається з моментом, коли дуга прольоту супутника проходить через точку зеніту, тобто коли  $\varphi_0 = 0$ . Більше того, зміна цього максимуму відбувається через обертання Землі, і екстремальний ефект такого обертання відбувається з користувачами на екваторі.

Доплерівський LTE був розроблений для забезпечення зв'язку навіть із високошвидкісними поїздами, що рухаються зі швидкістю близько  $v = 500$  км/год. Доплерівський зсув можна обчислити як  $f_d = (v \cdot f_c) = c$ , де  $v$  – відносна швидкість між передавачем і приймачем [12]. При несучій частоті  $f_c = 2$  ГГц можна отримати максимально допустимий доплерівський зсув  $f_d = 950$  Гц, і, відповідно до теореми вибірки Найквіста, максимальний період вибірки для правильної оцінки каналу становить 0,5 мс.

Доплерівський зсув дорівнює нулю, коли супутник перебуває у зеніті, тоді як при менших кутах місця виникають великі значення доплерівського зсуву [5].

Вираз доплерівського зсуву в закритій формі як функція кута місяця:

$$f_d(t) = \frac{f_0 \omega_{SAT} R_E \cos(\vartheta(t))}{c}, \quad (8)$$

де  $\omega_{SAT} = \sqrt{GM_E / (R_E + h)^3}$ ,  $G = 6,6710^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$  – гравітаційна постійна, а  $M_E = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}$  – маса Землі. У сценарії, якщо припустити несучу частоту в Ку-діапазоні, тобто в діапазоні  $11 \text{ ГГц} \leq f_0 \leq 14 \text{ ГГц}$ , максимальний доплерівський зсув виходить в діапазоні  $158 \text{ кГц} \leq f_d \leq 201 \text{ кГц}$ . Таким чином, доплерівський зсув у супутниковому каналі збільшується в  $x$  разів, при цьому  $166 \leq x \leq 211$ , щодо максимального доплерівського зсуву, що спостерігається в LTE. В таблиці 1 представлені параметри бюджету каналу супутниково-стільникової системи для забезпечення стабільного зв'язку між супутником та мобільною станцією. Для досягнення прямого доступу до супутникової мережі LEO з UT рішення має забезпечувати покращення принаймні в 4 дБ. У міру збільшення попиту на смугу пропускання потрібно більше потужності, що приймається. Наприклад, смуга пропускання 100 МГц відповідає покращенню потужності в 13,5 дБ.

Таблиця 1

Необхідний бюджет каналу супутниково-стільникової системи

Параметр	Значення
Відстань	550 км
Робоча частота	3,5 ГГц
Втрати у вільному просторі	158,1 дБ
Ефективна випромінювана ізотропна потужність	36,7 дБВт
Підсилення антени передачі	37,1 дБі
Підсилення антени прийому	0 дБі
Атмосферні втрати та загасання в дощ	5 дБ
Втрати від передавача	2 дБ
Втрати від приймача	2 дБ
Отримана потужність	-100,4 дБм

**Інші проблеми.** На практиці електромагнітні хвилі, що випромінюються, повинні відповідати деяким синхронним характеристикам для реалізації конструктивної інтерференції супутникових променів випромінювання. Перша – це синхронізація частоти, яка потребує чудової стабільності та точності радіочастотних модулів, встановлених на супутниках. Друга – це фазова синхронізація. Падіння електромагнітних хвиль на приймачі повинні мати однакову фазу, щоб максимізувати ефект суперпозиції напруженості поля. В іншому випадку накладений сигнал може бути гіршим, ніж одиночний. Тому початкову фазу передавача необхідно ретельно встановити після розгляду багатьох факторів. Третя – це тимчасова синхронізація. Супутники завжди перебувають у русі, постійно змінюючи своє становище, тому відстань між кожним супутником і UT по-різному. Якщо супутники одночасно надсилають сигнали на UT, приймач прийматиме їх у різний час, або сигнал може бути навіть занадто слабким для успішного прийому. Таким чином, сигнали, що передаються, повинні бути встановлені з додатковими затримками, щоб гарантувати їх одночасну доставку до приймача.

Міжсупутникові лінії зв'язку (ISL – Inter-Satellite Link) є каналами зв'язку між двома або більше супутниками на орбіті навколо Землі. Механізми захоплення, наведення та відстеження між супутниками досить складні, а лазерний зв'язок залежить від освітленості космосу та інших факторів. Для LEO-угруповань маршрутизація ISL є надзвичайно складною проблемою через постійну зміну відносного положення супутників LEO. Крім того, обробка сигналів на супутниках значно збільшує складність бортового обладнання супутників, знижуючи пристосовність супутників до технологічних оновлень.

Коли супутник виходить із зони покриття UT, UT вже повинен знаходитись під покриттям інших супутників. Отже, UT оцінює покриття кожного супутника та вибирає оптимальний.

Система обирає конкретний супутник відповідно до отриманого збільшення потужності, необхідного UT, положення супутника та інформації про його стан для прийняття рішення про перемикання променя.

Останній аспект, який слід ретельно врахувати при проектуванні системи супутниково-стільникового зв'язку, пов'язаний із рухом супутників. Зокрема, супутники у LEO-угрупованнях обертаються навколо Землі з великою кутовою швидкістю. Таким чином, ретрансляційні вузли, розгорнуті на землі, повинні часто перемикатися з поточного супутника на інший в зоні видимості, коли попередній опиняється за горизонтом або мінімально визначеним кутом місця, оскільки у стандарті LTE ретрансляційні вузли завжди вважаються фіксованими. Важливо визначити процедури передачі обслуговування супутника, зокрема існують два рішення щодо передачі обслуговування. Перше рішення полягає в передачі обслуговування на основі фізичного рівня, коли процедура хендверу виконується виключно на фізичному рівні, без задіявання вищих рівнів. Друге рішення це традиційний хендвер у випадку, якщо хендвер на основі фізичного рівня занадто складно реалізувати. Традиційний хендвер має більшу затримку у зв'язку з тим, що в стандарті LTE не передбачені рухомі ретрансляційні вузли. Обидва рішення мають свої переваги та недоліки стосовно затримки передачі та складності реалізації.

### Висновки

В даній роботі досліджено параметри розрахунку каналу інтегрованої системи стільниково-супутникового зв'язку. Серед проблем, які досліджувалися в статті є синхронізація супутникової передачі, забезпечення роботи міжсупутникових каналів зв'язку, атмосферне загасання, доплерівський зсув та перемикання променя.

Наведені в роботі обчислення дають можливість стверджувати про те, що з підвищенням частоти, атмосфера Землі впливає на поширення радіосигналів. Тому, щоб регулювання спектра дозволяло впроваджувати технології, які можуть підтримувати високу пропускну здатність, вони повинні охоплювати традиційні конфігурації ліній зв'язку, такі як FDD, а також додаткові майбутні інновації, які могли б краще обробляти асиметричні і частково непарні піддіапазони.

Також, проаналізовано, що при фіксованій частоті переданого сигналу доплерівський зсув залежить від швидкості руху приймача відносно передавача, тобто чим вище швидкість руху, тим більше доплерівський зсув. Враховуючи фіксовану відносну швидкість між приймачем і передавачем, маємо, що чим вища частота переданого сигналу, тим більший доплерівський зсув сприймається приймачем. Для забезпечення нормального безпроводового зв'язку зв'язку, максимальна швидкість переміщення приймача відносно передавача обмежена та має бути меншою, або дорівнювати 350 км/год і 500 км/год у сценаріях LTE і NR відповідно.

В перспективі вирішення проблем з синхронізацією в телекомунікаційних системах, можна більш глибоко розглянути тип синхронізації з використанням Глобальної навігаційної супутникової системи – GNSS, в поєднанні з внутрішнім сервером синхронізації - +1588V2, що наразі є оптимальним рішенням для NR.

### Список використаної літератури:

1. 5G Non-Terrestrial Networks / A. Vanelli-Coralli et al. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2023.
2. A Multifaceted Look at Starlink Performance / N. Mohan et al. WWW '24: The ACM Web Conference 2024, Singapore Singapore. New York, NY, USA, 2024. URL: <https://doi.org/10.1145/3589334.3645328>.
3. An integrated satellite–terrestrial 5G network and its use to demonstrate 5G use cases / B. Evans et al. International Journal of Satellite Communications and Networking. 2021. Vol. 39, no. 4. P. 358–379. URL: <https://doi.org/10.1002/sat.1393>.
4. Democratizing Direct-to-Cell Low Earth Orbit Satellite Networks / L. Liu et al. GetMobile: Mobile Computing and Communications. 2024. Vol. 28, no. 2. P. 5–10. URL: <https://doi.org/10.1145/3686138.3686140>.

5. Doppler Effect Mitigation in LEO-Based 5G Non-Terrestrial Networks / A. K. Meshram et al. 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Kuala Lumpur, Malaysia, 4–8 December 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/gcwshps58843.2023.10464931>.
- 6 Hybrid Satellite & Terrestrial Mobile Network for 4G : Candidate Architecture and Space Segment Dimensioning / E. Corbel et al. 2008 4th Advanced Satellite Mobile Systems (ASMS), Bologna, Italy, 26–28 August 2008. 2008. URL: <https://doi.org/10.1109/asms.2008.35>.
7. Integration Between LTE and Satellite Networks / R. Takaki et al. Telecommunications and Information Technology. Cham, 2015. P. 143–160. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23823-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23823-4_9).
8. Li Z., Wang X., Zhang T. 5G+4G: Creating High Quality Network Capability. 5G+. Singapore, 2020. P. 57–62. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6819-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6819-0_5) (date of access: 08.08.2024).
9. LTE-based satellite communications in LEO mega-constellations / A. Guidotti et al. International Journal of Satellite Communications and Networking. 2018. Vol. 37, no. 4. P. 316–330. URL: <https://doi.org/10.1002/sat.1258>.
10. Modi A., Sharma V., Rawat A. Compact Design of Multiband Antenna for IRNSS, Satellite, 4G and 5G Applications. 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, India, 8–10 April 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/iccmc51019.2021.9418265>.
11. Othman al Janaby A., Al-Omary A., Y. Ameen S. Taming Existing Satellite and 5G Systems to Next Generation Networks. International Journal of Computing and Digital Systems. 2024. Vol. 15, no. 1. P. 1465–1472. URL: <https://doi.org/10.12785/ijcds/1601108>.
12. Using LTE in 4G satellite communications: Increasing time diversity through forced retransmission / M. Papaleo et al. 2008 10th International Workshop on Signal Processing for Space Communications (SPSC), Rhodes Island, Greece, 6–8 October 2008. 2008. URL: <https://doi.org/10.1109/spsc.2008.4686699>.

#### *Автори статті*

**Макаренко Анатолій** – доктор технічних наук, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-4081-328X

**Яковець Всеволод** – аспірант, старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0002-3866-8017

**Блаженний Назарій** – PhD, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-3826-7400

**Горохов Олександр** – аспірант, старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-5053-3820

#### *Authors of the article*

**Makarenko Anatoliy** – Doctor of Science (technic), Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-4081-328X

**Yakovets Vsevolod** – postgraduate, senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0002-3866-8017

**Blazhennyi Nazariy** – PhD (technic), State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-3826-7400

**Horokhov Oleksandr** – postgraduate, senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-5053-3820