

Яковець В.П., Макаренко А.О., Гринкевич Г.О., Хаб'юк Н.С.

Державний університет телекомунікацій, Київ

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БПЛА-РЕТРАНСЛЯТОРІВ В ІНТЕГРОВАНИХ TN ТА NTN-МЕРЕЖАХ

Анотація. Об'єднання наземних (TN – Terrestrial Network) та неназемних (NTN – Non-Terrestrial Network) мереж – це перспективний напрямок розвитку комунікаційних систем доступу та надання послуг. В роботі представлено перспективи інтеграції TN-NTN мереж за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що виконують функції ретрансляторів та супутників, розташованих на низькій навколосезній орбіті (LEO – Low Earth Orbit), та що забезпечують зв'язок на частоті 6 ГГц. Використання БПЛА в якості телекомунікаційних ретрансляторів на сьогоднішній день стає більш розповсюдженим концептом завдяки низькій вартості та високій мобільності, що дозволяє надавати широкий спектр послуг великій кількості користувачів практично в будь-якій точці виділеної території. Багаторівнева система доступу з використанням цільного супутникового LEO-угруповання дозволяє розвантажити велику частку трафіку, що надходить на БПЛА від наземних користувачів (GUE – Ground Users). Перенесення трафіку БПЛА на NTN-сегмент значно знижує вірогідність збоїв низхідного каналу зв'язку БПЛА з 70% до майже нуля, а також підвищує якість висхідного каналу в умовах оптимальної елевації супутників LEO-угруповання. Завдяки розвантаженню трафіку в NTN вірогідність збоїв в висхідному каналі зв'язку зменшується приблизно на 12%. Незважаючи на обмежену смугу пропускання, що доступна на частотах нижче 6 ГГц, БПЛА з NTN-розвантаженням відповідають вимогам швидкості передачі даних C&C, що становить 60-100 кбіт/с для одного БПЛА на TN-стілник. Менше завантаження БПЛА призводить до пропорційно вищих показників, що при таких умовах дозволяє надавати широкосмугові послуги. Ефективне розвантаження трафіку БПЛА в NTN-сегмент дозволяє підтримувати прийнятний рівень коефіцієнту сигналу до шуму та перешкод (SINR – Signal to Interference + Noise Ratio).

Ключові слова: БПЛА, TN, NTN, супутниковий зв'язок, контроль та управління.

Yakovets V.P., Makarenko A.O., Grynkevych G.O., Khabiuk N.S.

State University of Telecommunications, Kyiv

PROSPECTS OF USING UAV-REPEATERS IN INTEGRATED TN AND NTN-NETWORKS

Abstract. The combination of terrestrial (TN - Terrestrial Network) and non-terrestrial (NTN - Non-Terrestrial Network) networks is a promising direction for the development of communication access systems and service provision. The paper presents the prospects of integrating TN-NTN networks using unmanned aerial vehicles (UAVs), which perform the functions of repeaters and satellites located in low Earth orbit (LEO - Low Earth Orbit), and which provide communication at a frequency of 6 GHz. The use of UAVs as telecommunication relays is becoming a more widespread concept today due to low cost and high mobility, which allows providing a wide range of services to a large number of users at almost any point of the allocated territory. A multi-level access system using a dense satellite LEO group allows you to offload a large part of the traffic coming to the UAV from ground users (GUE - Ground Users). The transfer of UAV traffic to the NTN segment significantly reduces the probability of UAV downlink communication failures from 70% to almost zero, and also increases the quality of the uplink under conditions of optimal elevation of LEO satellites. Due to the offloading of traffic in NTN, the probability of failures in the uplink communication channel is reduced by about 12%. Despite the limited bandwidth available below 6 GHz, UAVs with NTN offload meet C&C data rate requirements of 60-100 kbps per UAV per TN cell. Less loading of the UAV leads to proportionally higher indicators, which under such conditions allows for the provision of broadband services. Effective offloading of UAV traffic to the NTN segment allows maintaining an acceptable level of the signal to interference + noise ratio (SINR – Signal to Interference + Noise Ratio).

Key words: UAV, TN, NTN, satellite communication, control and management.

© Яковець В.П., Макаренко А.О., Гринкевич Г.О., Хаб'юк Н.С. 2022

1. Вступ. Завдяки своїй низькій вартості та високій мобільності безпілотні літальні апарати (БПЛА) незабаром можуть взяти на себе важливі завдання, включаючи пошук та рятування, доставку та дистанційне зондування. У наступному десятилітті БПЛА-таксі також можуть змінити те, як ми дістаємося до роботи і, у свою чергу, те, де ми живемо та працюємо.

В якості альтернативи наземному ущільненню БПЛА можуть підтримуватись позаземними мережами (NTN), наприклад, через угруповання супутників на низькій навколоземній орбіті (LEO). В основному орієнтовані на райони з недостатнім обслуговуванням, NTN також можуть бути використані для розширення можливостей з'єднання в містах, наприклад коли оператор наземної мережі (TN) іноді орендує спектр та інфраструктуру у оператора NTN. Дійсно, поточні зусилля 3GPP з інтеграції TN-NTN дозволять мобільним пристроям безперешкодно перемикатися з одного сегмента на інший.

В статті досліджено інтегровану мережу TN-NTN, що включає розгортання наземного стільникового зв'язку в парі з супутниковим угрупованням LEO, що забезпечує зв'язок на частоті нижче 6 ГГц міському району, населеному наземними користувачами (НК) та БПЛА. Визначено переваги перенесення останніх у NTN як у низхідній (DL), так і в висхідній (UL) лініях для різних елевацій супутника та схем повторного використання променя, а також враховуються основні характеристики поширення, моделі антен та сценарії розгортання, визначені 3GPP.

Саме тому дослідження перспектив використання БПЛА-ретрансляторів в інтегрованих TN та NTN-мережах, є актуальною, що дозволить надавати широкий спектр послуг великій кількості користувачів практично в будь-якій точці виділеної території.

2. Аналіз досліджень і публікацій. БПЛА потребує надійного підключення для управління та контролю (C&C – Command & Control) та передачі корисних даних для конкретної місії. Передача даних в режимі реального часу в мобільну мережу та з неї для БПЛА досліджено в [1 - 7].

Для цих та інших програм БПЛА будуть передавати дані в режимі реального часу в мобільну мережу та з неї, що потребує надійного підключення для управління та контролю (C&C – Command & Control) та передачі корисних даних для конкретної місії [1 - 7].

Однак через свою висоту БПЛА отримують/створюють перешкодні сигнали прямої видимості (LoS – Line of Sight) від/до безлічі стільників відповідно перешкоджаючи декодуванню повідомлень C&C і порушуючи роботу традиційних наземних користувачів (НК) [8]. Технічні рішення цієї проблеми були представлені в 4G LTE [9 - 11] та 5G NR [12] для роботи з кількома підключеними БПЛА. Більш просунуті рішення залежать, наприклад, від перевернутих стільників [13 - 15], масивних МІМО [16] чи безстільникових архітектур [17] і можуть бути менш економічно вигідними у короткостроковій перспективі, оскільки вимагають модернізації виділеної мережі.

3. Мета дослідження. Зважаючи на результати аналізу та наявні рішення в сфері поєднання TN-NTN та БПЛА визначимо, що метою даної публікації є дослідження ефективності конвергенції БПЛА-ретрансляторів в інтегрованих TN та NTN-мережах, що дозволить надавати широкий спектр послуг великій кількості користувачів практично в будь-якій точці виділеної території.

4. Інтегроване розгортання TN-NTN мереж. У цьому та наступному розділі представлено топологію мережі та моделі каналів, що використовуються. Додаткові подробиці наведено у таблиці 1. Представлено стільникову TN, як зазначено у 3GPP [11]. Також припускається наявність сегмента NTN через низькоорбітальний супутник з орбітою 600 км. Представлено портативні НК і БПЛА, всі з яких можуть підключатися або до TN або NTN (рис.1).

Наземна мережа: базові станції (BS – Base Station) розгорнуті у вигляді шестикутника і обмінюються даними з відповідними наборами підключених користувачів по низхідній та висхідній лініях зв'язку. Місця розгортання складаються з трьох спільно розташованих BS,

кожна з яких покриває один сектор, тобто TN-стілник, з кутовим інтервалом 120° . Для міжділянкової відстані ISD_{TN} площа TN-стілника задається як $A_{TN} = \sqrt{3} \cdot ISD_{TN}^2 / 6$.

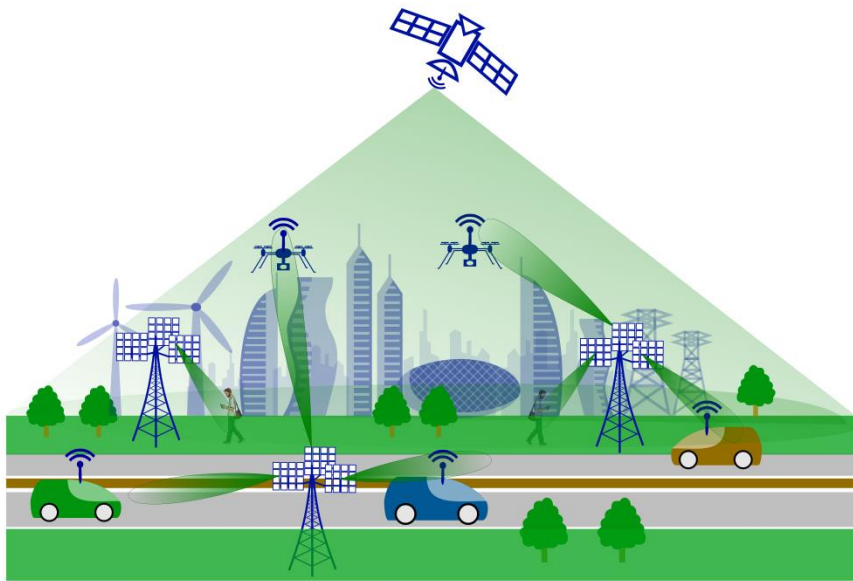


Рис. 1. Ілюстрація інтегрованої мережі TN-NTN, що включає наземний та супутниковий сегменти, що обслуговують НК та БПЛА у міській місцевості

Неназемна мережа: супутниковий сегмент LEO генерує кілька променів для обслуговування користувачів як у низхідній, так і в висхідній лінії зв'язку. Промені направлені до землі у вигляді шестикутника, кожен з яких створює один відповідний NTN-стілник. Відстань між сусідніми променями розраховується відповідно до ширини променя на половинній потужності (HPBW – Half-Power Beamwidth) діаграми спрямованості кожного променя. Через свій орбітальний рух супутник LEO видно під різними кутами елевації з точки зору TN, і, відповідно, зона охоплення його променів, що рухаються по Землі, охоплює різні області на землі. Ми вивчаємо, як на продуктивність NTN впливає кут елевації, оскільки це впливає на необхідну щільність угруповання LEO.

Населення користувачів: як TN, так і NTN здатні обслуговувати НК та БПЛА, наприклад, надаючи першим дані, а останньому – дані та інформацію C&C. Припускається, що вся сукупність користувачів сконцентрована в міській зоні розміром A_U , міститься в стільнику NTN і в результаті виходить загальна кількість TN-стілників: A_U/A_{TN} . На цій ділянці НК розташовуються як на відкритому повітрі, на висоті $h_{вих} = 1,5$ м, так і в приміщенні, на висоті в багатоповерхових будинках. БПЛА літають на вулиці на висоті, що притаманна БПЛА.

Розподіл спектру: припускається, що TN і NTN використовують ортогональні смуги частот та дуплексний зв'язок із частотним поділом (FDD – Frequency Division Duplexing). Як для TN, так і для NTN припускається, що номінальні несучі частоти низхідної та висхідної ліній зв'язку дорівнюють 2 ГГц.

Для TN доступна смуга пропускання повністю повторно використовується у всіх стільниках. Для NTN розглядаються два можливі коефіцієнти повторного використання частоти (FRF – Frequency Reuse Factors), а саме: 1) $FRF = 1$, коли всі частотні ресурси повністю повторно використовуються у всіх променях, та 2) $FRF = 3$, коли вони діляться на три набори, кожен з яких повторно використовується через кожні три промені. Як буде показано, останній підхід жертвує піковою продуктивністю на користь зниження інтерференції між сусідніми променями та, у свою чергу, підвищує продуктивність на межі стільника.

5. Характеристики каналу зв'язку. Основні характеристики каналу поширення сигналу описано нижче та зведено в таблицю 1 [11, 18].

Параметри досліджуваної системи

TN-розгортання	
Схема стільникової мережі	Шестикутна сітка над зоною $A_U = 52 \text{ км}^2$, $ISD_{TN} = 500 \text{ м}$, три сектори на ділянку, одна BS на сектор 25 м
Частотний діапазон	FRF=1, $B_x = 10+10 \text{ МГц}$ (DL+UL) при 2 МГц
Потужність передачі BS	46 дБм
Антенні елементи	Гориз./верт. HPBW: 65° , макс. підсилення: 8 дБі
Антенна решітка	10 x 1, нахил вниз: 12° , відстань між елементами: 0.5λ
Коефіцієнт шуму	7 дБ
NTN-розгортання	
Схема стільникової мережі	Орбіта: 600 км, 7 променів, направлених в центр шестикутної сітки, кут елевації: різний
Частотний діапазон	FRF=1, $B_x = 30+30 \text{ MHz}$ (DL+UL) при 2 ГГц FRF=3, $B_x = 10+10 \text{ MHz}$ (DL+UL) при 2 ГГц
Потужність передачі	34 дБВт/МГц на промінь
Променева антена	Рефлектор з круговою апертурою, HPBW: 4.41° , макс. підсилення: 30 дБі
Підсилення/Температура	1.1 дБ/К коефіцієнт підсилення до теплового шуму антени
Користувачі	
Розподілення користувачів	В середньому 15 користувачів на сектор TN
Розподілення НК	80% в приміщ., гориз.: однорідн., h _{in} : однорідн. в будівлях від чотирьох до восьми поверхів 20% на вул., гориз.: однорідн., h _{out} = 1.5 м
Розподілення БПЛА	На вул, гориз.: однорідн., h _{БПЛА} : 150 м
Відношення БПЛА/НК	3GPP вип. 2: 0.7%, вип. 3: 7.1%
Призначення користувачів	Заснована на RSRP (великомасштабне загасання)
Планувальник	DL: циклічне однокористувацьке планування, $B_k = B_x$ UL: циклічне багатокористувацьке планування, $B_k = 360 \text{ кГц}$
Контроль потужності UL	TN: частковий контроль потужності з $a = 0.80$, $P_0 = -85 \text{ дБм}$, та $P_{\max} = 23 \text{ дБм}$ NTN: завжди максимальна потужність $P_{\max} = 23 \text{ дБм}$
Антенна користувача	Всенаправлена, посилення: 0 дБі
Коефіцієнт шуму	9 дБ
Модель каналу	
Великомасштабне загасання	Urban Macro згідно з
Дрібномасштабне загасання	TN-НК: Релейне TN-БПЛА та NTN-БПЛА: повний LoS
Тепловий шум	Спектральна щільність -174 дБм/Гц

Втрати на трасі та тіньове загасання. Всі радіоканали схильні до втрат на трасі та логарифмічно нормальних тіньових загасань, які залежать від умов прямої видимості на лінії та моделюються відповідно з [11]. TN-канали явно враховують висоту передавача і приймача, так як це має вирішальне значення при моделюванні БПЛА-користувачів, підключених до стільникового зв'язку, оскільки для вищі БПЛА пряма видимість є критичною [11]. NTN-канали враховують кут елевації супутника LEO, тобто кут між лінією, що вказує на супутник, та ближньою горизонтальною площиною. Кути елевації ближче до оберненого зеніту, тобто 90° , дають більш короткі відстані від LEO до користувача і з більшою ймовірністю знаходяться у прямій видимості. Порівняно з TN-каналом сигнал, що передається каналом NTN, проходить кілька додаткових етапів поширення. В результаті

загальні втрати на трасі складаються з додаткових складових, що враховують загасання через атмосферні гази та мерехтіння.

Підсилення антени: Припускається, що всі НК та БПЛА мають одну всеспрямовану антену з єдиним посиленням. Будемо вважати, що кожна TN BS оснащена вертикальною, нахиленою вниз, однорідною лінійною антенною решіткою, з напівспрямованими елементами та одним радіочастотним ланцюжком. Остання дає реалістичну діаграму спрямованості, що моделює верхні бічні пелюстки, видимі БПЛА. Нарешті, припускається, що антена, що генерує промінь кожного супутника LEO, є типовим рефлектором з круглою апертурою.

Загальний великомасштабний коефіцієнт посилення потужності на лінії включає втрати на трасі, тіньові загасання і коефіцієнт посилення антени як в передавачі, так і в приймачі. $G_{x,k}$ позначається великомасштабне посилення потужності між стільником x і користувачем k , з нижнім індексом $x \in \{t, n\}$, що стосується або конкретного TN-стільника t , або конкретного NTN-стільника n .

Маломасштабне загасання: Подібно, можна зазначити $h_{x,k}$, маломасштабне блокове загасання між стільником x та користувачем k . Припускається, що НК, підключені до TN мають релієвське загасання, а БПЛА-канали знаходяться в умовах повного LoS-поширення завдяки своєму піднятому розташуванню з урахуванням перешкоджаючих будівель.

Управління потужністю (TN): по низхідному каналу припускається, що всі BS TN передають дані з однаковою потужністю P_t . У висхідному каналі, який має важливе значення, використовується фракційне керування без зворотного зв'язку для всіх учасників, які підключені до TN. Відповідно, потужність P_k , що передається користувачем k , визначається у відповідності з TN-стільником, що обслуговує користувача на даний момент:

$$P_k = \min\{P^{max}, P_0 \cdot G_{t,k}^\alpha\}, \quad (1)$$

де P^{max} – максимальна потужність передачі користувача, P_0 – параметр, регульований мережею, експонента $\alpha \in [0, 1]$ – коефіцієнт регулювання часткової потужності, а $G_{t,k}$ – великомасштабне завмирання між користувачем k та TN-стільником t . Метою (1) є компенсація частки α великомасштабних загасань до межі, що визначається P^{max} .

Управління потужністю (NTN): управління частковою потужністю висхідної лінії зв'язку не застосовується до користувачів, підключених до NTN, при цьому остання передає з максимальною потужністю $P_k = P^{max}$. Так само фіксована потужність P_n низхідної лінії зв'язку завжди використовується кожним NTN-стільником.

6. Опис запропонованої методології призначення стільників та розвантаження користувачів БПЛА-TN-NTN інтегрованих рішень

Щоб вивчити переваги, що забезпечуються NTN-сегментом, була порівняна продуктивність НК та БПЛА в інтегрованій TN-NTN із продуктивністю базової автономної TN. У цьому розділі представлені випадки призначення та розвантаження користувачів, які приймаються у кожному випадку. Крім того, будуть докладніше розглянуті на ключові показники ефективності, що становлять інтерес.

Через T і N позначаються набори стільників TN і NTN відповідно, а через U_x – безліч активних користувачів, пов'язаних з стільником x . ST і SN позначаються як безліч користувачів, що обслуговуються TN та NTN відповідно.

Автономна TN: у звичайному випадку автономної TN всі НК і БПЛА пов'язані з TN-стільником, що забезпечує найбільшу потужність опорного сигналу, що приймається (RSRP – Reference Signal Received Power). Для користувача k останній відповідає стільнику x , що забезпечує найбільший великомасштабний виграш $G_{x,k}$.

Розвантаження БПЛА в NTN: у разі інтегрованої TN-NTN ми припускаємо, що всі НК будуть обслуговуватись TN, а користувачі БПЛА будуть перенесені до сегменту NTN. Як стане ясно з розділу числових результатів, цей вибір викликаний взаємними перешкодами

між повітряною та наземною передачею, коли продуктивність БПЛА (відповідно НК) може бути серйозно порушена у низхідному (відповідно до висхідного) каналі [16].

Визначимо ключові показники ефективності. При ортогональному розподілі спектру між TN і NTN значення відношення сигнал-перешкода-шум (SINR – Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) низхідної та висхідної ліній для заданого частотно-часового фізичного блоку ресурсів (PRB – Physical Resource Block) користувача k , що обслуговується TN-стільником t , визначаються як:

$$SINR_{t,k}^{DL} = \frac{P_t \cdot G_{t,k} \cdot |h_{t,k}|^2}{\sum_{\tau \in \mathbb{T} \setminus t} P_\tau \cdot G_{\tau,k} \cdot |h_{\tau,k}|^2 + \sigma_k^2}, \quad (2)$$

$$SINR_{t,k}^{UL} = \frac{P_k \cdot G_{t,k} \cdot |h_{t,k}|^2}{\sum_{l \in S_T \setminus k} P_l \cdot G_{t,l} \cdot |h_{t,l}|^2 + \sigma_k^2}. \quad (3)$$

де σ_k^2 – дисперсія теплового шуму в смузі пропускання B_k , до якої має доступ користувач k . Відповідно, SINR DL і UL на PRB користувача k , що обслуговується NTN-стільником n , визначаються як:

$$SINR_{n,k}^{DL} = \frac{P_n \cdot G_{n,k} \cdot |h_{n,k}|^2}{\sum_{v \in \mathbb{N} \setminus t} P_v \cdot G_{v,k} \cdot |h_{v,k}|^2 + \sigma_k^2}, \quad (4)$$

$$SINR_{n,k}^{UL} = \frac{P_k \cdot G_{n,k} \cdot |h_{n,k}|^2}{\sum_{l \in S_N \setminus k} P_l \cdot G_{n,l} \cdot |h_{t,l}|^2 + \sigma_k^2}. \quad (5)$$

Швидкість R_k , досяжна для користувача k , обслуговуваного стільником x , може бути пов'язана з її SINR (як у низхідній, так і висхідній лінії зв'язку) як:

$$R_k = \eta_k B_k E[\log_2(1 + SINR_{x,k})], \quad (6)$$

де x означає обслуговуючий TN- або NTN-стільник в залежності від типу призначення користувачів, B_k – смугу пропускання, виділену користувачеві k , а η_k – частку часу, протягом якого користувач k знаходиться в розкладі стільника x , і де очікування приймається на основі дрібномасштабних загасань. У низхідному каналі ми припускаємо, кожен стільник x мультиплексує свій набір пов'язаних користувачів U_x у часовій області, що дає $\eta_k = |U_x|^{-1}$, і виділяє всю доступну смугу B_x запланованому користувачеві k , тобто $B_k = B_x$. У висхідному каналі ми припускаємо, що мультиплексування користувачів відбувається як у часовій, так і в частотній областях, при цьому кожному користувачеві виділяється смуга пропускання B_k і $N_x = \min\{B_x/B_k, |U_x|\}$ користувачів, запланованих одночасно кожен на частку часу $\eta_k = N_x/|U_x|$. Цей вибір обумовлений обмеженням бюджетом потужності, доступним користувачеві.

7. Обговорення результатів проведеного дослідження

Експериментальні дослідження з низхідним каналом. У цьому розділі описані проведені експерименти по низхідному та висхідному каналам для оцінки приросту продуктивності, що забезпечується розвантаженням трафіку БПЛА в інтегрованій мережі TN-NTN. Розглядаються БПЛА, що летять на висоті $h_{\text{БПЛА}} = 150$ м, що є складним сценарієм співіснування НК-БПЛА.

На рис. 2 показаний CDF SINR низхідній лінії зв'язку на PRB, з яким стикаються БПЛА при підключенні до автономної TN і розвантаженні до сегменту NTN. Для останнього розглядаються два кути місця LEO-супутника (90° та 87°) та дві схеми повторного використання частот променя (FRF = 1 та FRF = 3). Для порівняння на рисунку також показано SINR, що спостерігається в БПЛА від TN, коли домінуючі інтерферентні TN-стільники відключені, щоб гарантувати мінімальне SINR -5 дБ (проксі для покриття). Можна зробити такі спостереження:

– автономні TN насилу забезпечують надійне охоплення БПЛА з високим рівнем сигналу, при цьому їх SINR падає нижче -5 дБ у 70% випадків (суцільний зелений). Це

відповідає попереднім результатам [1].

– перенесення БПЛА в сегмент NTN забезпечує покриття, що дає SINR в діапазоні від -3 дБ до 17 дБ залежно від того, який розглядається кут елевації супутника LEO і схеми повторного використання частоти променя, що розглядається нижче.

– перехід від $FRF = 3$ до $FRF = 1$ спричиняє повне повторне використання і, отже, міжпроменеві перешкоди. Останнє погіршує медіанне значення SINR приблизно на 8 дБ (суцільний колір у порівнянні з пунктирним синім) та 14 дБ (суцільний у порівнянні з червоним пунктиром) для супутника LEO при кутах елевації 90° та 87° відповідно.

– SINR БПЛА помітно погіршується, коли супутник LEO переміщується з 90° на 87° через більшу дальність розповсюдження та менше посилення антени. Дійсно, враховуючи НРВW $4,41^\circ$, кут місця 87° означає, що обслуговування здійснюється майже на краю променя. Проте всі БПЛА, розвантажені за допомогою NTN, залишаються в зоні дії, навіть за наявності міжпроменевих перешкод (червона пунктирна лінія).

– придушення перешкод TN за рахунок відключення стільників гарантує покриття для всіх БПЛА (зелена крапкова лінія). Однак результуючі SINR нижчі, ніж досяжні при NTN-розвантаженні. Крім того, такий підхід приносить у жертву значну кількість радіоресурсів, оскільки для позбавлення кожного БПЛА домінуючих перешкод приблизно 12 TN-стільників мають простоювати. Останнє призводить до втрати пропускну здатності застарілих НК, що буде кількісно визначено надалі.

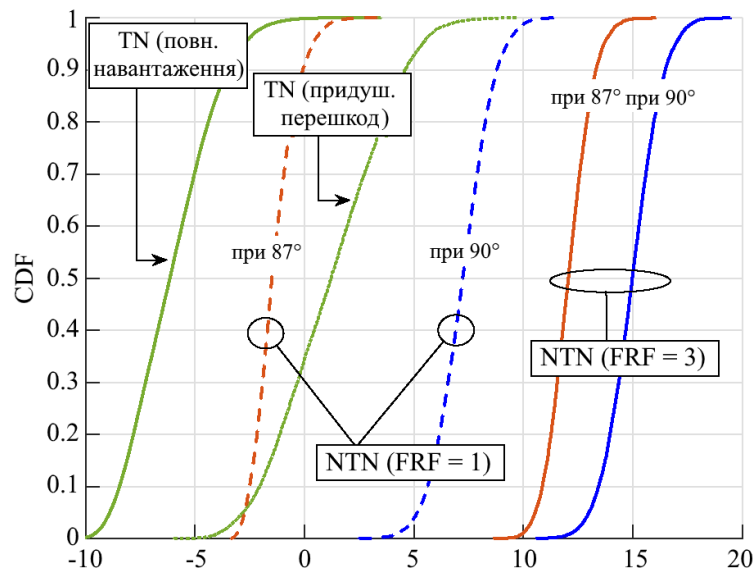


Рис. 2. CDF SINR низхідної лінії зв'язку на PRB, що спостерігається в БПЛА при підключенні до автономної TN і при розвантаженні до сегменту NTN. Для останнього розглядаються два кути елевації LEO-супутника та дві схеми повторного використання частот променя. Для порівняння також показано SINR, отриманий від TN з придушенням перешкод

На рис. 3 показані середні та 95%-ві швидкості низхідної лінії зв'язку, досяжні за допомогою НК та БПЛА у випадках 2 і 3 3GPP, відповідно, відповідні одному активному БПЛА на кожні 10 TN-стільників і одному активному БПЛА на TN-стільник. На цьому рисунку передбачається, що $FRF = 3$, що відповідає вищому SINR в сегменті NTN, але також скорочення доступної смуги пропускання на $2/3$. Обчислення тарифів здійснюється відповідно до методології (6), припускаючи, що користувачі розподілені по міському району площею $A_U = 61 \text{ км}^2$, що приблизно дорівнює розміру міста 50 км. На рис. 3 розглядаються чотири різних сценарії: 1) автономна TN, що обслуговує як НК, так і БПЛА; 2) автономна TN, в якій домінуючі стільники відключаються на певних PRB для забезпечення покриття БПЛА; 3) та 4) інтегрована TN-NTN, в якій трафік БПЛА перенаправляється на LEO-супутник, видимий під кутом 90° та 87° відповідно.

Рис. 3 містить такі висновки:

– у випадку 2, що відповідає 72 активним БПЛА над розглянутою міською територією, передача трафіку БПЛА низхідною лінією зв'язку в сегмент NTN призводить до помітного п'ятикратного збільшення швидкості БПЛА, коли супутник LEO знаходиться під кутом 90° .

– через стабільніший бюджет каналу NTN показники розвантажених з допомогою NTN БПЛА демонструють меншу дисперсію, ніж їх аналог TN, з невеликим відносним розривом між середнім значенням та показниками 95%. В усіх розглянутих сценаріях середня швидкість БПЛА залишається на рівні рекомендованих 60-100 кбіт/с для C&C [11]. Це відбувається навіть у випадку 3, в якому розглядається 720 активних БПЛА над міською територією, і коли LEO-супутник переміщається з 90° на 87° .

– в автономній TN швидкість DL не залежить від передбачуваного проникнення БПЛА, оскільки загальна кількість користувачів, що обслуговуються кожним стільником, залишається незмінною. Однак вивантаження БПЛА в NTN трохи збільшує швидкість НК, оскільки пропускна здатність кожного TN-стільника повинна бути розділена між меншою кількістю користувачів.

– автономні TN з придушенням перешкод гарантують такі ж середні швидкості для БПЛА, як і NTN у випадку 2. Однак це відбувається за рахунок зниження швидкостей застарілих НК, недолік, якого не має NTN-розвантаження.

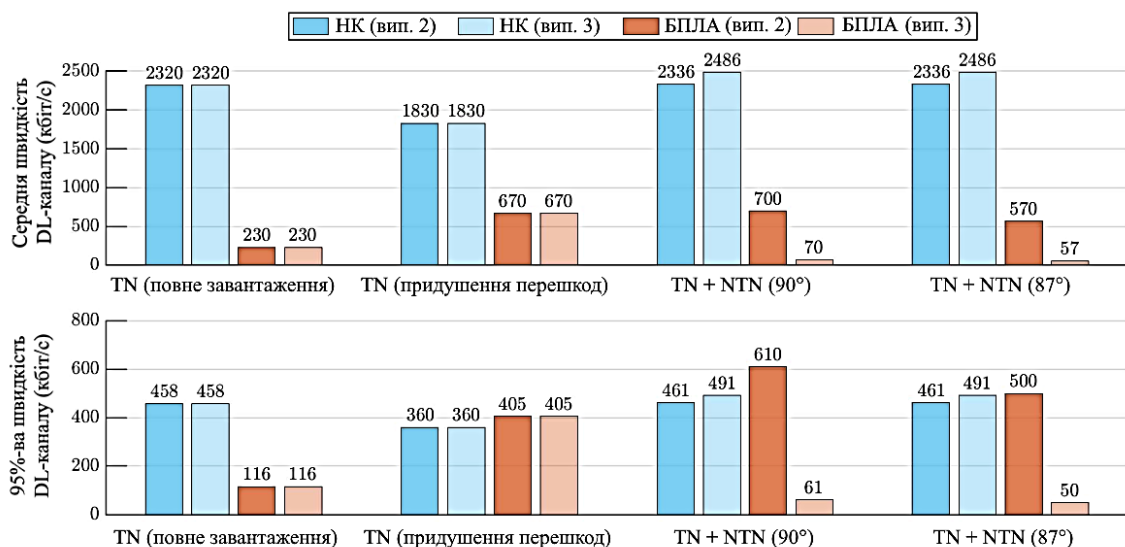


Рис. 3. Середні та 95%-ві швидкості низхідної лінії зв'язку для НК та БПЛА, коли: 1) всі вони обслуговуються повністю завантаженою TN; 2) гарантовано придушення перешкод на БПЛА за рахунок зарезервованих ресурсів; 2) та 3) БПЛА вивантажуються в сегмент NTN під кутом 90° та 87° , відповідно, з $FRF = 3$. Розглянуто обидва випадки 3GPP 2 та 3, що відповідають проникненню 72 та 720 БПЛА до міського району

Експериментальні дослідження із висхідним каналом. На рис. 4 показано CDF висхідного SINR на PRB для НК і БПЛА у випадку 3, коли всі вони підключені до автономної TN і коли трафік БПЛА вивантажується в сегмент NTN. Для останнього розглядаються два кути елевації LEO-супутника та дві схеми повторного використання частот променя. Можна зробити такі висновки:

– навіть за наявності часткового управління потужністю перешкоди висхідної лінії зв'язку, створювані БПЛА, можуть поставити під загрозу характеристики НК, викликаючи падіння їх SINR нижче -5 дБ у 12% випадків (чорна штрих-пунктирна лінія). Кількість таких збоїв різко скорочується до 1% за рахунок передачі трафіку БПЛА на NTN (чорна крапкова лінія).

– при розвантаженні в NTN БПЛА бачать підвищення SINR висхідного каналу до тих пір, поки міжпроменеві перешкоди утримуються в прийнятних межах (суцільна зелена лінія порівняно з синьою/червоною лініями). У той час як середній коефіцієнт посилення SINR може досягати 9 дБ у порівнянні з базовим рівнем TN в ідеальних умовах (LEO-супутник при 90° і $FRF = 3$, суцільна синя лінія), деякі БПЛА можуть вийти з ладу в найгірших сценаріях (LEO-супутник при 87° з повним повторним використанням частоти, пунктирна червона лінія).

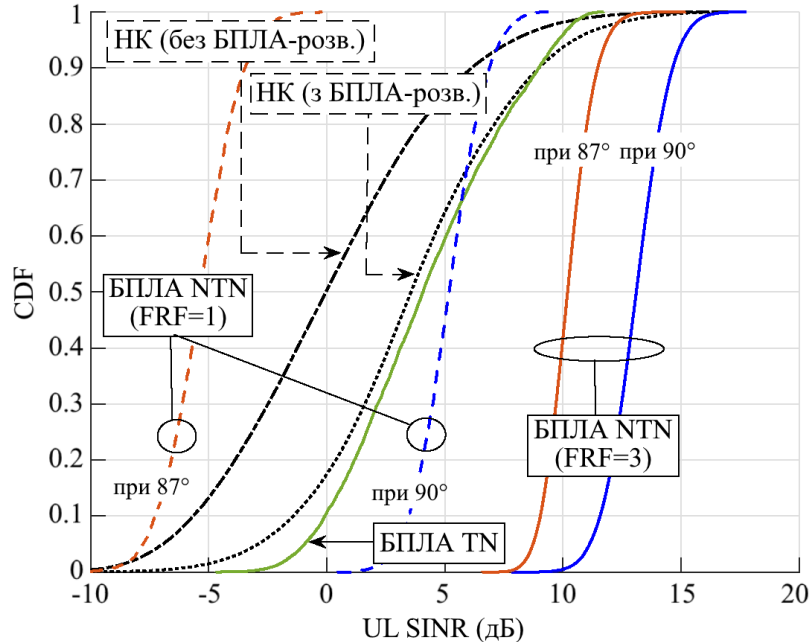


Рис. 4. CDF висхідного SINR на PRB НК і БПЛА у випадку 3, коли всі вони підключені до автономної TN і коли БПЛА вивантажені в сегмент NTN. Для останнього враховуються два кути елевації LEO-супутника та два значення FRF

Рис. 5 доповнює картину, показуючи середні та 95%-ві швидкості висхідної лінії зв'язку для НК та БПЛА, коли: 1) всі обслуговуються повністю завантаженою TN; 2) TN використовує координацію перешкод, виділяючи НК та БПЛА окремі радіоресурси у пропорціях, призначених для забезпечення швидкостей С&С 100 кбіт/с на БПЛА; 3) та 4) БПЛА вивантажуються в сегмент NTN під кутом 90° та 87° відповідно. Знову ж таки, випадки 2 і 3 3GPP розглядаються для проникнення користувачів БПЛА. Рис. 5 підказує такі важливі спостереження:

– у випадку 2 автономна TN здатна забезпечити покриття для більшості НК та БПЛА. У випадку 3 розвантаження трафіку БПЛА по висхідній лінії зв'язку NTN підвищує швидкість НК приблизно на 50%, хоча останнє відбувається за рахунок зниження швидкості БПЛА.

– навіть у випадку 3 – з одним активним БПЛА на стільник в міській зоні розміром з 50 км^2 – і зі смугою пропускання всього 10 МГц на промінь, БПЛА, розвантажені в NTN, досягають швидкості близько 60 кбіт/с для С&С.

– NTN-розвантаження перевершує автономну TN, яка забезпечує частотно-часову ортогональність між НК та БПЛА, оскільки останні потребують велику кількість радіоресурсів, що призводить до низької швидкості передачі даних.

Основні висновки можна резюмувати так:

– безпілотні літальні апарати, підключені до автономної мережі TN, втрачають майже 70% пропускну здатності низхідної лінії зв'язку при польоті на висоті 150 м через перешкоди «земля-повітря». Розвантаження трафіку БПЛА в сегмент NTN забезпечує надійне покриття, а також перевершує TN, що реалізує координацію перешкод.

– безпілотні літальні апарати, підключені до мережі TN, генерують сильні перешкоди у висхідному каналі, викликаючи – у найбільш складному сценарії – до 12% НК, які виходять з ладу, навіть за практичного часткового контролю потужності. Такі збої знижуються до менше 1%, коли трафік висхідної лінії зв'язку БПЛА перенаправляється в NTN.

– у разі промєневих перешкод БПЛА з розвантаженням NTN можуть вийти з ладу, коли елевація NTN падає до 87° і нижче, що вимагає ретельного проектування повторного використання променя відповідно до щільності LEO-угруповання.

– для території розміром 50 км^2 NTN може забезпечити швидкість C&S 60–100 кбіт/с для одного БПЛА на TN-стілник. Менше завантаження БПЛА призводить до пропорційно вищих показників, що потенційно дозволяє використовувати широкосмугові мережі.

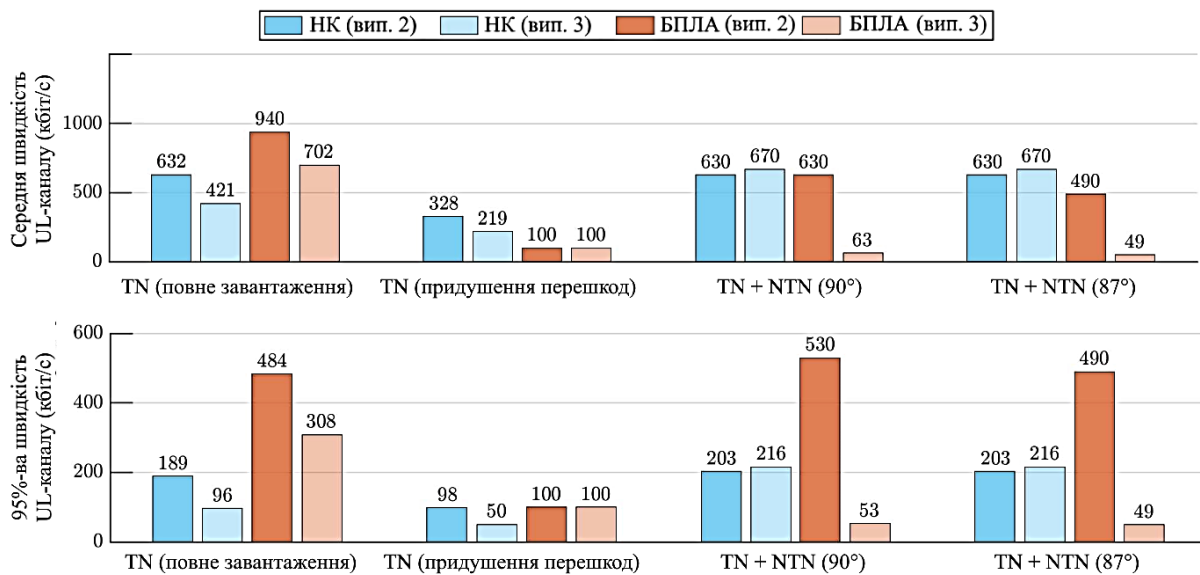


Рис. 5. Середні швидкості висхідної лінії зв'язку для НК та БПЛА, коли: 1) всі вони обслуговуються повністю завантаженою TN; 2) автономна TN резервує радіоресурси для БПЛА, щоб гарантувати швидкість C&S 100 кбіт/с; 3) БПЛА вивантажуються в сегмент NTN під кутом 90° ; і 4) БПЛА вивантажуються в сегмент NTN під кутом 87° . Випадок 3GPP 2 та 3 розглядаються для щільності БПЛА

8. Висновки. У цій статті досліджено підтримку зв'язку БПЛА через інтегровану мережу TN-NTN, що працює на частотах нижче 6 ГГц. Перенаправивши трафік БПЛА на сегмент космічного базування LEO, головною ціллю стала гарантія надійного БПЛА-покриття без зниження продуктивності співіснуючих НК. Дослідження показало, що перебої в низхідній лінії зв'язку безпілотних літальних апаратів з NTN-розвантаженням, що літають на висоті 150 м, різко скоротилися з 70% майже до нуля. У БПЛА також спостерігається покращення коефіцієнту SINR висхідного каналу зв'язку, поки супутникове угруповання LEO досить щільне, щоб гарантувати мінімальний кут елевації. Розвантаження БПЛА в NTN також може принести користь застарілим НК, особливо у плані висхідної лінії зв'язку, оскільки це запобігає близько 12% простоїв, які інакше сталися б з НК. Незважаючи на обмежену смугу пропускання, доступну нижче 6 ГГц, БПЛА з NTN-розвантаженням задовольняють вимоги до мінімальної швидкості управління та контролю навіть у міській, де на стільник припадає один активний БПЛА. Оскільки в короткостроковій та середньостроковій перспективі очікується рідше застосування БПЛА, можна очікувати пропорційно вищі показники, що дозволить застосовувати широкосмуговий повітряний зв'язок.

References

1. The path to 5G-Advanced and 6G Non-Terrestrial Network systems / Guidotti, Alessandro & Vanelli-Coralli, Alessandro & Schena, Vincenzo & Chuberre, Nicolas & Jaafari, Mohamed & Puttonen, Jani & Cioni, Stefano // 2022.
2. LEO Satellite Access Network (LEO-SAN) Towards 6G: Challenges and Approaches / Xiao, Zhenyu & Yang, Junyi & Mao, Tianqi & Xu, Chong & Zhang, Rui & Han, Zhu & Xia, Xiang-Gen // 2022.
3. Cooperative Cellular UAV-to-Everything (C-U2X) communication based on 5G sidelink for UAV swarms / Mishra, Debashisha & Trotta, Angelo & Traversi, Emiliano & Felice, Marco & Natalizio, Enrico. // 2022 Computer Communications. 192. 10.1016/j.comcom.2022.06.001.
4. UAV-Assisted wireless communications / Zhang, Mingze // 2022.
5. Multi-HAPS Network Implementation within 3GPP's NTN framework for 5G and beyond / Anicho, Ogbonnaya & Charlesworth, Philip & Baicher, Gurvinder & Nagar, Atulya // 2021. 10.17972/ijicta20217152.
6. 5G-NTN GEO-based In-Lab Demonstrator using OpenAirInterface5G. / Kumar, Sumit & Astro, Abdelrahman & Kodheli, Oltjon & Querol, Jorge & Chatzinotas, Symeon & Schlichter, Thomas & Casati, Guido & Heyn, Thomas & Völk, Florian & Kaya, Sertac & Schwarz, Robert & Knopp, A. & Kapovits, Adam // 2022.
7. A Comprehensive Overview on 5G-and-Beyond Networks With UAVs: From Communications to Sensing and Intelligence / Wu, Qingqing & Xu, Jie & Zeng, Yong & Ng, Derrick Wing Kwan & Al-Dhahir, N. & Schober, Robert & Swindlehurst, A. // 2021. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. PP. 1-1. 10.1109/JSAC.2021.3088681.
8. UAV assisted wireless communication for 5G / Hydher, Hassaan // 2019.
9. Physical layer security for UAV communications: A comprehensive survey. China Communications / Wang, Jue & Wang, Xuanxuan & Gao, Ruifeng & Lei, Chengleyang & Feng, Wei & Ge, Ning & Jin, Shi & Quek, Tony Q.S. // (2022). 19. 77-115. 10.23919/JCC.2022.09.007.
10. A Modeling and Simulation Framework for UAVs Utilizing 4G-LTE Cellular Networks. / Jafer, Shafagh & Jones, Stephen & Vardhan, Ashok // 2018. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing. 09. 10.1142/S1793962318500423.
11. End-To-End Performance of an Uplink NB-IoT Transmission Relayed on a Low-Altitude UAV Platform with Non-Orthogonal Single-Carrier FDMA in the Optical Wireless Backhaul Link. Mobile Networks and Applications / Bas, Joan & Dowhuszko, Alexis // 2022. 1-16. 10.1007/s11036-022-01991-x.
12. Cellular UAV to device communications: Joint trajectory, speed, and power optimisation / Liu, Yaqin & Wu, Fanyi & Wu, Jianjun // 2021. IET Communications. 15. 10.1049/cmu2.12104.
13. An Optimal Multi-UAV Deployment Model for UAV-assisted Smart Farming / Salehi, Shavbo & Hassan, Jahan & Bokani, Ayub // 2022. 10.48550/arXiv.2207.13884.
14. High Capacity Millimeter Wave UAV Communications / Prelcic, Nuria & Heath, Robert & Rusu, Cristian & Klautau, Aldebaro // 2020. 10.1002/9781119575795.ch8.
15. PSO-Based Joint UAV Positioning and Hybrid Precoding in UAV-Assisted Massive MIMO Systems / Mahmood, Mobeen & Koc, Asil & Le-Ngoc, Tho // 2022.
16. OFDMA Based UAVs Communication for Ensuring QoS / Karabulut, M. Ali & Shah, A. F. M. Shahan & Islam, Md & Rana, Muhammad Ehsan // 2022. 10.1007/978-981-19-4831-2_27.
17. Review of 5G NTN Standards Development and Technical Challenges for Satellite Integration With the 5G Network / Hosseinian, Mohsen & Choi, Jihwan & Chang, Seok-Ho & Lee, Jungwon // 2021. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 36. 22-31. 10.1109/MAES.2021.3072690.
18. UAV Caching in 6G Networks: A Survey on models, techniques, and applications. Physical Communication / Duong, Trung & Kim, Kyeong Jin & Kaleem, Zeeshan & Bui, Minh-Phung & Vo, Nguyen-Son // 2021. 51. 101532. 10.1016/j.phycom.2021.101532.