

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

**на тему: “АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СЦЕНАРІЇВ
РОЗГОРТАННЯ NTN МЕРЕЖ З ВИСОКОЮ ПРОПУСКНОЮ
ЗДАТНІСТЮ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи РТДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Сивик О.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Кременецька Я.А.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Макаренко А.О.

(прізвище та ініціали)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра _____ Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти _____ Магістр

Спеціальність _____ 172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Мобільних та відеоінформаційних
технологій

_____ Н.В. Руденко

« » _____ 2021 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сивику Олександрю Степановичу

1. Тема роботи: “Аналіз та вдосконалення сценаріїв розгортання NTN мереж з високою пропускнуою здатністю”,
керівник роботи Кременецька Я.А.,
затвержені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи _____ 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Аналіз напрямків розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій.
Мережа 2030. FG-NET-2030: план технологій, додатків і ринкових драйверів до 2030 року і далі.

2. Основні аспекти проектування, управління топологією, передачі та розподілу ресурсів в низькоорбітальних системах LEO, висотних платформах HAPS.

3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Основні поняття, цільові характеристики, ключові технології NTN телекомунікацій.

2. Інтегрована система розгортання NTN мереж за допомогою супутників LEO та HAPS

3. Порівняння ефективності різних сценаріїв розгортання NTN мереж

5. Графічна частина роботи представлена на 10 слайдах презентації.

6. Дата видачі завдання 11.10.2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	12.10.21	Викон.
2.	Дослідження методів організації роботи мереж NTN	16.10.21	Викон.
3.	Аналіз сценаріїв розгортання NTN мереж за допомогою супутників LEO та HAPS	27.10.21	Викон.
4.	Порівняння ефективності різних сценаріїв розгортання NTN мереж	20.11.21	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	12.12.21	Викон.
6.	Розробка презентації	15.12.21	Викон.

Студент

Сивик О.С.

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Кременецька Я.А.

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

по магістерській кваліфікаційній роботі

Студента Сивик Олександра Степановича

на тему: “Аналіз та вдосконалення сценаріїв розгортання NTN мереж з високою пропускну здатністю ”

Актуальність:

Магістерська робота присвячена аналізу технологічних особливостей розвитку та вдосконаленню сценаріїв розгортання NTN мереж з високою пропускну здатністю. Впровадження неназемних NTN мереж, які працюють за різними технологіями, на різній висотних орбітах, мають різні характеристики зможе збільшити гнучкість та пропускну здатність майбутніх мереж 5G(6G). Для проектування та створення складних систем NTN необхідний цілісний підхід, в якому необхідно дослідити методи організації мереж космічного зв'язку між супутниками, та окремо мережі між супутниками та наземними станціями. Прогнозується, що розвиток мереж мобільного зв'язку 5G та майбутньої технології 6G будуть засновані на таких технологіях NTN.

Позитивні сторони:

В проведеному аналізі надано огляд сучасного стану роботи NTN в рамках 3GPP, детально пояснені аспекти проектування. Показано, що реалізація технологій 5G для неназемних мереж є реальністю. Проведено порівняння продуктивності різних сценаріїв розгортання NTN мереж за допомогою супутників LEO та HAPS.

Проведені дослідження свідчать про високий науково-технічний рівень використання інформаційних технологій в даному дослідженні. Робота викладена науковою мовою, логічно й послідовно відбиває мету та поставлені в роботі завдання. Пояснювальна записка відповідає стандартам до її оформлення.

Недоліки:

1. В роботі не достатньо проаналізовано процес хендоверу між ретрасляторами.
2. Недостатньо обґрунтовано наведено технологічні параметри.

Висновки:

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку “**відмінно**”, а студент Сивик Олександр Степанович - присвоєння кваліфікації “Магістр з телекомунікацій та радіотехніки, викладач вищих навчальних закладів”.

Якість проекту (роботи)	
Виконано на замовлення підприємства	
Виконано за тематикою НДР	
Виконано з макетом	
Виконано з застосуванням ЕОМ та МПТ	
Має практичну цінність	
Проект-частина комплексної теми	

Підпис рецензента

(_____)

Підпис

засвідчую

Підпис особи, що засвідчує

(

М.П.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

ПОДАННЯ ГОЛОВІ ДЕРЖАВНОЇ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ ЩОДО ЗАХИСТУ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Направляється студент Сивик О.С. до захисту магістерської роботи

(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

на тему: Аналіз та вдосконалення сценаріїв розгортання NTN мереж з високою пропускнуою здатністю

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор інституту _____

(підпис)

Кравченко В.І.

(прізвище та ініціали)

Довідка про успішність

Сивик О.С.

(прізвище та ініціали)

за період навчання в Навчально-науковому інституті телекомунікацій, з 21 року до 21 року повністю виконав (ла) навчальний план за напрямом підготовки, спеціальністю з таким розподілом оцінок за:

національної шкалою: відмінно _____%, добре _____%, задовільно _____%;

шкалою ECTS: A _____%; B _____%; C _____%; D _____%; E _____%.

Провідний фахівець інституту _____

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Висновок керівника магістерської роботи

Студент Сивик Олександр Степанович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння аналізувати перспективні рішення інтегрованих телекомунікаційних мереж, в яких застосовано технології неназемних NTN телекомунікацій, проводити порівняльний аналіз ефективності різних сценаріїв розгортання NTN мереж за допомогою супутників LEO та стратосферних ретрансляторів HAPS, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою в тому числі рекомендаціями МСЕ. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Магістерська робота виконана на високому рівні і заслуговує оцінку “відмінно”, а студент Сивик Олександр Степанович - присвоєння кваліфікації “Магістр з телекомунікацій та радіотехніки, викладач вищих навчальних закладів”.

Керівник роботи _____

(підпис)

Кременецька Я.А.

(прізвище та ініціали)

“ ”

_____ 202_ року

Висновок кафедри про магістерську роботу

Магістерську роботу розглянуто. Студент _____

Сивик О.С..

(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Державній екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

Мобільних та відеоінформаційних технологій

(підпис)

Руденко Н.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 64 с., 13 рис., 6 табл., 34 дж.

Об'єкт дослідження – сценарії розгортання неназемних телекомунікацій.

Предмет дослідження – дослідження методів збільшення ефективності телекомунікаційних систем із застосуванням інтеграції різних супутникових систем LEO, HAPS та наземних мереж.

Мета роботи – аналіз аспектів проектування, управління топологією, передачею та розподілу ресурсів в низькоорбітальних системах LEO, висотних платформах HAPS, порівняння за пропускнуою здатністю різних інтегрованих з наземними мережами.

Метод дослідження – на основі теоретичного дослідження, порівняльного аналізу характеристик супутникових, стратосферних та наземних систем зв'язку.

У магістерській роботі проведено аналіз технологічних особливостей розвитку та вдосконаленню сценаріїв розгортання NTN мереж з високою пропускнуою здатністю. Досліджено методи організації мереж космічного зв'язку між супутниками та мереж між супутниками та наземними станціями. Показано, що для проектування та створення складних систем NTN з високою пропускнуою здатністю необхідний цілісний підхід, що враховує різні супутникові технології із різними характеристиками, численні адаптовані сценарії розгортання системах із застосуванням супутникових сузір'їв LEO, висотних платформ HAPS для збільшення гнучкості та ефективності майбутніх мереж 5G(6G).

5G, НЕНАЗЕМНІ МЕРЕЖІ, NON-TERRESTRIAL NETWORK, СИСТЕМИ ВИСОТНИХ ПЛАТФОРМ, HAPS, АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖ, СУПУТНИКОВИЙ ДОСТУП

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СПОСОБИ УТВОРЕННЯ МЕРЕЖІ NTN.....	10
1.1 Роль неназемних мереж.....	10
1.2 Загальні відомості системи NAPS	12
1.3 Типи супутникових орбіт	17
1.4 Особливості передачі сигналів в космічному просторі	21
1.5 Діапазони робочих частот систем зв'язку через ШСЗ.....	23
2 ПОСЛУГИ ПО БАГАТОПРОМЕНЕВИМ НЕНАЗЕМНИМ МЕРЕЖАМ З ПІДТРИМКОЮ 5G NR.....	26
2.1 Мережі радіодоступу для NR NTN	26
2.2 Послуги та системні аспекти NR NTN.....	30
2.3 Багатопроменева модель NTN 5G NR	33
3 СЦЕНАРІЇ РОЗГОРТАННЯ NTN МЕРЕЖ	40
3.1 Сценарій розгортання NTN мережі за допомогою низькоорбітальних угруповань.....	40
3.2 Сценарій розгортання NTN мережі на основі геостаціонарних супутників	46
3.3 Сценарій розгортання NTN мережі за допомогою NAPS.....	49
3.4 Порівняння продуктивності супутникових GEO і LEO систем наступного покоління та волоконно-оптичних систем	
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	67
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА	Безпілотний літальний апарат
ШСЗ	Штучний супутник Землі
eMBB	Розширений мобільний широкосмуговий доступ (enhanced Mobile Broadband)
GEO	Геостаціонарна орбіта (Geosynchronous Equatorial Orbit)
HAPS	Станція на висотній платформі (High-altitude platform station)
HARQ	Гібридний запит на повторення (Hybrid Automatic Repeat Request)
LEO	Низька навколоземна орбіта (Low Earth Orbit)
MEO	Середня навколоземна орбіта (Medium Earth Orbit)
NTN	Неназемна мережа (Non-Terrestrial Network)
QoS	Якість обслуговування (Quality of Experience)
RAN	Мережа радіодоступу (Radio Access Network)
RTT	Час затримки (Round-trip time)
SBA	Область синхронного променя (Synchronized Beam Area)
SFMBT	Одночастотна багатопроменева передача (Single-Frequency Multi-Beam Transmission)
UE	Користувацький термінал (User Equipment)
VSAT	Мала супутникова наземна станція (Very Small Aperture Terminal)

ВСТУП

Технології NTN (англ. non-terrestrial network) стає загальним терміном для будь-якої мережі, яка включає літаючі неназемні об'єкти. Сімейство NTN включає мережі супутникового зв'язку, системи висотних платформ (HAPS) та мережі "повітря-земля". Неназемна мережа (NTN) з підтримкою 5G можливо стануть ефективним рішенням для надання послуг у будь-який час, у будь-якому місці та збільшить зону покриття. У цьому контексті в роботі аналізуються рішення для супутникових систем з високою пропускнуою здатністю та вдосконаленою технологією багатопроменевої передачі, завдяки їхній здатності збільшувати пропускну здатність системи за рахунок повторного використання частот, збільшення швидкості передачі даних користувачем та спектральної ефективності системи. Адаптація 5G для підтримки неназемних мереж спричиняє цілісний дизайн, що охоплює безліч областей, від мережі радіодоступу до послуг та системних аспектів системи. У цій роботі ми пропонуємо нову схему управління радіоресурсами одночастотної багатопроменевої передачі (SFMBT), для ефективної доставки послуг мобільного широкосмугового зв'язку (eMBB) через багатопроменеві системи NTN 5G NR. Основна ідея полягає в тому, щоб згрупувати промені у виділені області променя, в яких певний потік контенту доставляється за допомогою одночасних багатопроменевих передач по одним і тим же радіоресурсам, не викликаючи перешкод між променями. Моделювання проводиться за різними сценаріями з метою оцінки ефективності запропонованого алгоритму SF-MBT порівняно з поточними схемами, заснованими на повторному використанні частот. Загальносистемна продуктивність оцінюється з погляду сукупної швидкості передачі, середньої пропускнуої спроможності і спектральної ефективності системи. Тому актуальним є проаналізувати основні технології неназемних мереж, також аспекти проектування, проблеми реалізації та напрями наступних досліджень, зробити порівняльний аналіз за основними критеріями NTN мереж та волоконно-оптичними системами.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СПОСОБИ УТВОРЕННЯ МЕРЕЖІ NTN

1.1 Роль неназемних мереж

Серед основних принципів 5G - здатність ефективно та надійно передавати інформацію. Системи 5G – це не лише нові протоколи, але, що ще важливіше, вони забезпечують нову телекомунікаційну інфраструктуру. Таким чином, одне із завдань полягає у досягненні надійної інтеграції між наземним та неназемним сегментами. Оскільки супутники зв'язку пропонують можливості великомасштабного мовлення та глобального покриття, вони є ефективними засобами зв'язку для мереж на основі 5G, особливо для підключення віддалених районів і бортових, морських платформ. За останні кілька років багато операторів супутникового зв'язку оновили свій парк, щоб забезпечити розширені функціональні можливості та більш високе повторне використання частот. На додаток до існуючого парку геостаціонарних супутників, наступне покоління супутникових систем МЕО і LEO буде дуже гнучким і буде в десять разів більш потужним, ніж існуючі угруповання. Супутники та інші неназемні платформи, такі як дирижаблі або БПЛА, покращують системи 5G, роблячи їх більш гнучкими, розумними та надійними.

Очікується, що неназемні мережі, завдяки своїм широким можливостям покриття та зменшеній уразливості космічних та повітряних транспортних засобів до фізичних атак та стихійних лих, зможуть:

- сприяти розгортанню послуги 5G в необслуговуваних районах, які не можуть бути покриті наземною мережею 5G (ізолювані або віддалені райони, на борту літаків або суден) і в недостатньо обслуговуваних районах (наприклад, приміські або сільські райони), щоб покращити продуктивність обмежених наземних мереж економічно ефективним способом;
- підвищити надійність послуги 5G, забезпечуючи безперервність

обслуговування для пристроїв M2M/IoT або для пасажирів на борту рухомих платформ (наприклад, пасажирських транспортних засобів, літаків, кораблів, високошвидкісних потягів, автобусів) або забезпечення доступності послуг у будь-якому місці, особливо для критичних комунікацій;

- запровадити масштабованість мережі 5G, забезпечуючи ефективні багато адресні та ширококомвні ресурси для доставки даних до країв мережі або навіть терміналу користувача.

Загальну мережу зв'язку, яка зростатиме з використанням технології 5G, можна розглядати як мережу мереж, оскільки вона дозволить адаптувати та комбінувати різні та альтернативні мережеві стеки та технології зв'язку. Завдяки можливостям ширококомвної та багатоадресної передачі, NTN і, зокрема, мережі супутникового зв'язку (SatCom) можуть грати безліч ролей у 5G, виступаючи як мережа радіодоступу (RAN) і як транзитне з'єднання для віддалених розгортань 5G. Супутниковий компонент може бути корисним як:

- резервне з'єднання: користувачі підключаються до мережі через стандартне наземне з'єднання (наприклад, ADSL) та інші вторинні з'єднання (наприклад, супутникове). Первинне з'єднання використовується в нормальних умовах, в той час як інше включається у разі збою або несправності, щоб замінити стандартне з'єднання (перемикання при відмові), що призводить до більш високої доступності та надійності обслуговування;

- розвантаження даних: користувачі вибирають основне з'єднання для надсилання та/або отримання даних. Супутникова мережа може забезпечувати додаткове з'єднання, спрямоване на усунення піків трафіку та збереження продуктивності певних конфіденційних потоків. Спеціальний маршрутизатор може бути налаштований для визначення та застосування правил залежно від статистики трафіку та певних механізмів, таких як фіксовані або динамічні пороги трафіку, щоб активувати додаткове з'єднання та розвантажити основний маршрут;

- паралельні незалежні канали: в мережі можуть бути присутні два або більше незалежних канали доступу або зворотного рейсу, які можуть використовуватися одночасно. Кожне посилання (одне з них може бути

супутниковим) керується окремим провайдером (ISP), який характеризується цільовою технологією та підписаною угодою про рівень обслуговування (SLA). Спеціальний маршрутизатор у приміщенні користувача може бути налаштований для збору всього локально згенерованого трафіку та пересилання його на основі критеріїв вартості, продуктивності для реалізації багатоканальної агрегації.

Варіант використання зазвичай відноситься до взаємодії між роллю та системою для досягнення певної мети. Отже, необхідно визначити мету послуги, яка забезпечується компонентом неназемної мережі, інтегрованим у систему 5G.

Для кожного з факторів надання послуг 5G варіанти використання, в яких компоненти не наземної мережі мають відігравати певну роль. До факторів, що забезпечують підтримку послуг 5G, відносяться eMBB (розширений мобільний широкосмуговий зв'язок), URLLC (наднадійний зв'язок із малою затримкою) та mMTC (масовий зв'язок машинного типу). Сценарії використання 5G відповідають взаємодіям між зацікавленою стороною (користувачем, оператором, постачальником послуг) та системою 5G для досягнення певної мети.

Хоча затримка розповсюдження супутникових систем може бути проблемою для певних додатків, що вимагають малої затримки, важливість супутників для критично важливих комунікацій, включаючи зв'язок для суспільної безпеки, через їхню надійність і велику зону покриття добре відома.

Отже, роль супутників і неназемних мереж має бути досліджена для забезпечення основних областей використання систем 5G, що охоплюють не тільки покращений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB), але й високу стійкість до відмов, самоналаштуваність, підтримка та безпека мереж спеціального призначення.

1.2 Загальні відомості системи HAPS

HAPS – це мережевий вузол, який працює у стратосфері на висоті близько 20 км. Завдяки унікальним властивостям стратосфери, HAPS може залишатися у квазістаціонарному положенні та робити значний внесок у забезпечення

повсюдного зв'язку. Дослідження, пов'язані з HAPS, можна простежити до 1990-х завдяки численним дослідженням показало перспективну повсюдного підключення до Інтернету з особливим упором на сільські райони та програми для надання допомоги при стихійних лихах [1]. Далі ми підемо на крок уперед і покажемо, як використання систем HAPS може сприяти розвитку передових послуг мобільного бездротового зв'язку із надшироким покриттям та високою пропускною здатністю.

Останнім часом HAPS обговорюється як життєздатний компонент повітряної мережі завдяки розвитку технологій зв'язку та досягнень у галузі підвищення ефективності сонячних панелей, легких композитних матеріалів, автономної авіоники та антен. Оскільки витрати залежать від часу і з'являються більш економічні технології та матеріали, використання систем HAPS стане більш економічно доцільним у майбутніх мережах. Очікується, що з розробкою передових матеріалів та здійсненням необхідних технологічних ривків у найближчі роки поступово з'являться нові можливості. Ці дослідні тенденції призвели до того, що HAPS активно сприймається як можлива технологія для мереж бездротового зв'язку майбутнього. Хоча вибір джерела енергії розглядався як фундаментальне питання у дослідженнях HAPS, сонячна енергія у поєднанні з накопиченням енергії розглядалася як основний засіб забезпечення енергією систем HAPS, оскільки вони мають великі поверхні, які підходять для розміщення сонячних панелей [2]. Більш того, завдяки своїм характеристикам низької затримки в порівнянні з супутниковими мережами, що з'являються, HAPS може надавати бездротові послуги безпосередньо користувачам наземних мереж [3].

У зв'язку з постійними збоями в дизайні бездротового зв'язку (наприклад, у проектах, заснованих на даних) та появі нових варіантів використання (наприклад, розподілених платформ машинного навчання та центрів обробки даних) системи HAPS стали більш привабливими через їх потенційні переваги. З цієї точки зору автономна повітряна куля, що забезпечує доступ до Інтернету у віддалену область. Настала ера портативних центрів обробки даних, інтелектуальних підсилювачів сигналів, літаючих базових станцій та платформ

машинного навчання, здатних приймати інтелектуальні рішення для величезної кількості вантажних дронів та літаючих автомобілів. Фактично, ми передбачимо майбутнє з сузір'ям HAPS, що забезпечує доступ до мережі з високою пропускнуою здатністю, розвантаження обчислень та інструменти аналізу даних для мільйонів користувачів. пристрої у приміських районах, а й у щільних міських районах.

Рівень HAPS, який виступає як великомасштабний інтелектуальний об'єкт, забезпечує швидкий, надійний та ефективний зв'язок на великій відстані між супутниками, минаючи необхідність встановлення мільйонів наземних та морських ретрансляційних станцій [4]. Він також може функціонувати як розподілений центр обробки даних для запису орбітальних траєкторій супутників, моніторингу попереджень про з'єднання та розрахунку ймовірності зіткнення між ними. Своєчасна доступність такої інформації для різних супутникових компаній має життєво важливе значення для збереження функціональних можливостей супутників. Крім того, супутники допомагають рівню HAPS покращувати характеристики передачі обслуговування. Рівень HAPS відповідає за управління мобільністю безпілотних літальних апаратів (БПЛА) шляхом надання прикордонного інтелекту, розвантаження важких обчислень та обробки великомасштабних зондувань та моніторингу, які корисні для систем доставки та моніторингу. Очікується, що комунікаційна платформа безперешкодно оброблятиме різноманітні комунікаційні вимоги, такі як наднадійний зв'язок із малою затримкою (URLLC) та покращений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB). Рівень HAPS забезпечує швидкий доступ до Інтернету та послуги бездротового зв'язку, такі як IoT та розподілене машинне навчання, для міських, приміських та віддалених районів, знижуючи залежність від наземних та супутникових мереж.

Завдяки цим можливостям ми припускаємо, що використання систем HAPS може бути засобом вирішення архітектурних проблем, які виникнуть зі збільшенням використання повітряних компонентів у бездротових мережах. Використання систем HAPS як нових платформ бездротового доступу для

майбутніх систем бездротового зв'язку має великий потенціал.

HAPS знаходиться у стратосфері, шарі атмосфери Землі. Цей рівень має унікальні властивості, що робить його придатним для розгортання HAPS. Тут практично немає погодних явищ, таких як блискавка чи гроза. Через відсутність хмар у цьому шарі сонячна енергія може ефективно використовуватись без забруднення атмосфери. Понад те, стратосфера безпечна для розгортання, оскільки перебуває над висотою комерційного повітряного руху. Через ці внутрішні особливості стратосфери два різні типи стратосферних платформ (аеростатичні та аеродинамічні) можуть бути розгорнуті, щоб залишатися в квазістаціонарному положенні над Землею протягом тривалого часу. Загалом система зв'язку HAPS складається з двох частин: неназемної частини та наземної частини.

Неземна частина – це частина, яка включає всі основні відносні мережеві компоненти в повітрі або космосі, а також основні бортові підсистеми для ефективного розгортання HAPS і успішної системи зв'язку. Складається з двох сегментів, а саме з бортової підсистеми та неназемної мережі.

Бортові підсистеми здебільшого складаються з трьох підсистем: підсистема управління польотом, підсистема енергоменеджменту та підсистема корисного навантаження зв'язку. Підсистема управління польотом призначена для стабілізації платформи, управління її рухливістю та напрямки її в заданому напрямку. Для цього потрібні датчики для вимірювання висоти та напрямки HAPS, обчислювальний блок для прийняття рішень та виконавчі механізми для виконання бажаного руху та орієнтації. Крім того, блок управління польотом управляє інтерфейсом між платформою та наземною станцією управління.

Це виконується за допомогою сигналів телеметрії, стеження та команд, які повідомляють про стан платформи та забезпечують важливий двосторонній потік інформації між HAPS та його наземною станцією управління [5]. Підсистема управління енергоспоживанням управляє процесом виробництва та зберігання енергії, а також регулює споживання енергії іншими підсистемами.

Підсистема корисного навантаження зв'язку відповідає за керування

зв'язком між HAPS та іншими об'єктами. Залежно від місії HAPS та цільових програм у корисне навантаження може бути включено різне обладнання та технології. Додаткові деталі підсистем енергії та корисного навантаження обговорюватимуться у підрозділах IV-C та IV-D.

Неназемні мережі представляють всі неназемні вузли зв'язку в аерокосмічній області, які потенційно задіяні в системах зв'язку HAPS, як показано. HAPS може бути з'єднаний з іншими HAPS і утворити угруповання або він може бути частиною мережі з різними рівнями супутників. Більш того, рівень HAPS може бути пов'язаний з різними типами низьковисотних платформних станцій (LAPS), такими як базові станції або ретранслятори БПЛА або може обслуговувати рій з різними типами користувачів БПЛА.

Наземну частину можна розділити на три сегменти: станція управління, комунікаційний шлюз та наземні мережі.

Станція управління керує операціями зв'язку між HAPS та різними типами користувачів. Крім того, він організує канали зв'язку та керує ресурсами між декількома вузлами HAPS та іншими неназемними або наземними мережами. Крім того, станція управління керує процесом зльоту/посадки, дистанційно контролює положення HAPS і контролює його напрямок, щоб максимізувати ефективність антени та покращити характеристики.

Комунікаційний шлюз з'єднує HAPS із базовою мережею через провідну транспортну інфраструктуру. Залежно від корисного навантаження HAPS і типу наземної мережі, HAPS може безпосередньо зв'язуватися з наземними користувачами, або обмінюватися інформацією даних через комунікаційний шлюз. Станція управління та комунікаційний шлюз можуть бути розташовані в одному будинку або різних місцях. В основному вони складаються з підсилювачів, процесорів та антен. Антени, які зазвичай використовуються, мають параболічні відбивачі, щоб гарантувати високий коефіцієнт спрямованості.

Наземні мережі включають всі наземні вузли або користувачів, що беруть участь у системах зв'язку HAPS. Сюди входять наземні базові станції та різні типи користувачів, наприклад мобільні користувачі та датчики IoT.

1.3 Типи супутникових орбіт

У наш час використовується декілька різних орбіт для розміщення супутників, які можна використовувати для мережі NTN. Найбільшу увагу прикуто до геостаціонарної орбіти, яка може бути використана для «стаціонарного» розміщення супутника над тією чи іншою точкою Землі. Орбіта, обрана для роботи супутника, залежить від його призначення. Наприклад, супутники, які використовуються для прямого мовлення телевізійних програм, поміщають на геостаціонарну орбіту. Багато супутників зв'язку також знаходяться на геостаціонарній орбіті. Інші супутникові системи, зокрема ті, які використовуються для зв'язку між супутниковими телефонами, обертаються на низькій навколоземній орбіті.

Траекторія руху ШСЗ називається орбітою. Під час вільного польоту супутника, коли його бортові реактивні двигуни вимкнені, рух відбувається під впливом гравітаційних сил і за інерцією, причому головною силою є тяжіння Землі.

Конкретна орбіта, яка обирається для роботи супутника, залежить від безлічі факторів, серед яких - функції супутника, а також обслуговує їм територія. В одних випадках це може бути вкрай низька навколоземну орбіту, що знаходиться на висоті всього 160 кілометрів над Землею, в інших випадках супутник знаходиться на висоті більше 36000 кілометрів над Землею - тобто, на геостаціонарній орбіті GEO. Більш того, ряд супутників використовує не кругову орбіту, а еліптичну.

По мірі обертання супутників на навколоземній орбіті вони з неї зміщуються через сили тяжіння Землі. Якби супутники не обертається по орбіті, вони б почали поступово падати на Землю і згоріли б в верхніх шарах атмосфери. Для кожної з орбіт існує своя розрахункова швидкість, яка дозволяє збалансувати силу тяжіння Землі і відцентрову силу, утримуючи апарат на постійній орбіті і не даючи йому ні набирати, ні втрачати висоту [6].

Ракета повинна набрати швидкість в 40320 кілометрів на годину, щоб повністю подолати земну гравітацію і полетіти в космос. Космічна швидкість куди більше, ніж потрібно супутнику на орбіті. Вони не долають земну гравітацію, а знаходяться в стані балансу. Орбітальна швидкість - це швидкість, необхідна для підтримки балансу між гравітаційним притяганням і інерціальним рухом супутника. Це приблизно 27359 кілометрів на годину на висоті 242 кілометри. Без гравітації інерція забрала б супутник в космос. Навіть з гравітацією, якщо супутник буде рухатися занадто швидко, його віднесе в космос. Якщо супутник буде рухатися занадто повільно, гравітація притягне його назад до Землі.

Орбітальна швидкість супутника залежить від його висоти над Землею. Чим ближче до Землі, тим швидше швидкість. На висоті в 200 кілометрів орбітальна швидкість складає 27400 кілометрів на годину. Для підтримки орбіти на висоті 35786 кілометрів супутник повинен мати швидкість 11300 кілометрів на годину. Ця орбітальна швидкість дозволяє супутнику робити один оберт за 24 години. Оскільки Земля також обертається 24 години, супутник на висоті в 35786 кілометрів знаходиться у фіксованій позиції щодо поверхні Землі. Ця позиція називається геостаціонарна. Геостаціонарна орбіта ідеально підходить для метеорологічних супутників і супутників зв'язку.

В цілому, чим вище орбіта, тим довше супутник може залишатися на ній. На низькій висоті супутник знаходиться в земній атмосфері, яка створює опір. На великій висоті немає практично ніякого опору, і супутник, як місяць, може перебувати на орбіті століттями [7].

Для того щоб супутник міг використовуватися для надання послуг зв'язку, наземні станції повинні мати можливість «стежити» за ним з метою отримання з нього сигналу і відправки сигналу на нього. Зрозуміло, що зв'язок із супутником можлива лише тоді, коли він знаходиться в зоні видимості наземних станцій, і, в залежності від типу орбіти, він може перебувати в зоні видимості лише в короткі проміжки часу.

Кругові орбіти можна класифікувати за кількома параметрами. Такі терміни, як Низька навколосемна орбіта, Геостаціонарна орбіта та інші вказують

на відмінну рису конкретної орбіти. Короткий огляд визначень кругових орбіт представлений в таблиці 1.1 [6].

Таблиця 1.1

Визначення супутникових орбіт

Назва орбіти	Абревіатура	Висота орбіти (в кілометрах)
Низька навколоземна орбіта	LEO	200 – 1200
Середня навколоземна орбіта	MEO	1200 – 35790
Геосинхронна орбіта	GSO	35790
Геостаціонарна орбіта	GEO	35790
Висока навколоземна орбіта	HEO	Вище 35790

Зі збільшенням висоти орбіти, на якій знаходиться супутник, збільшується і період його звернення по даній орбіті. На висоті 35790 кілометрів над Землею супутнику потрібно 24 години для повного витка навколо планети. Така орбіта відома як геосинхронна, так як вона синхронізована з періодом обертання Землі навколо своєї осі.

Дуже популярною супутникової орбітою є геостаціонарна орбіта. Вона використовується для розміщення супутників багатьох типів, включаючи супутники, що забезпечують зв'язок та доступ до мережі Інтернет.

Перевагою геостаціонарної орбіти є те, що супутник, що знаходиться на ній, постійно розташовується в одній і тій же позиції, що дозволяє направляти на нього фіксовану антену наземної станції.

Окремим випадком геосинхронної орбіти є геостаціонарна орбіта. При використанні такої орбіти напрямок руху супутника навколо Землі відповідає напрямку обертання самої планети, а період обертання космічного апарату приблизно дорівнює 24 годинам. Геостаціонарна орбіта зображена на рис. 1.1. Це означає, що супутник обертається з тією ж кутовою швидкістю, що і Земля, в тому ж напрямку і, отже, постійно знаходиться в одній і тій же точці відносно

поверхні планети [8].

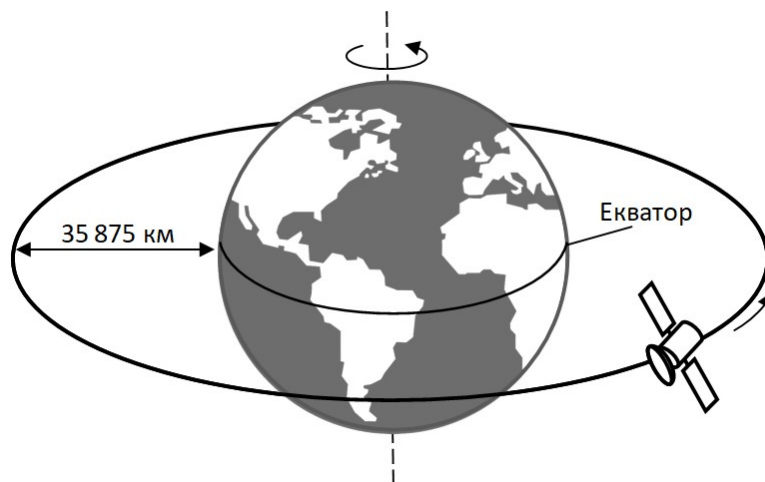


Рис. 1.1. Геостаціонарна орбіта

Якщо вважати Землю строго сферичної, а дія гравітаційного поля Землі - єдиною силою, що впливає на супутник, то рух ШСЗ підпорядковується відомим законам Кеплера: воно відбувається в нерухомій площині, що проходить через центр Землі, - площини орбіти; орбіта має форму еліпса або кола (окремий випадок еліпса).

Особливістю еліптичної орбіти є наявність двох важливих точок на ній. Одна з них розташована в місці найбільшого віддалення від Землі. Ця точка відома, як апогей - в ній швидкість руху космічного апарату знижується до мінімальних показників, так як тут сила земної гравітації відчувається найменше. Точка, в якій супутник знаходиться найближче до Землі, відома як перигей - при проході через неї супутник рухається з найбільшою швидкістю. Еліптичну орбіту зображено на рис 1.2.

При русі супутника повна механічна енергія (кінетична і потенційна) залишається незмінною, внаслідок чого при видаленні супутника від Землі швидкість його руху зменшується.

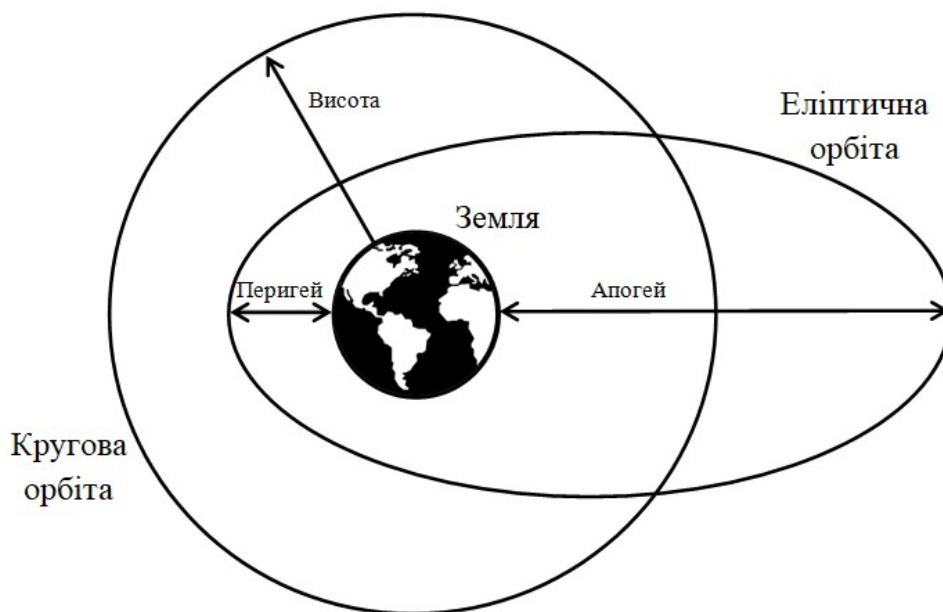


Рис. 1.2. Кругова та еліптична орбіта

Для виконання деяких завдань може вимагатися розміщення супутника на високій навколосемній орбіті. У цих випадках період обертання супутника навколо Землі перевершує 24 години, а крім того відстань до супутника є чималим, що призводить до більшої затримки під час руху сигналу з Землі до супутника і назад, а також великих втрат сигналу.

Вибір орбіти супутника залежить від функцій, які він виконує. У той час, як для організації прямого мовлення і подібних послуг, як правило, використовуються супутники, розташовані на геостаціонарних орбіт, для систем GPS і навіть для мобільної телефонії використовуються супутники, що обертаються набагато нижче.

1.4 Особливості передачі сигналів в космічному просторі

Велика протяжність лінії зв'язку між земними станціями і ретранслятором, що знаходяться на борту ШСЗ, призводить до запізнювання сигналів.

Запізнення сигналів призводить до появи помітних для абонентів ехосигналів, що виникають при переході з чотирьох провідних ланцюгів зв'язку на двохпровідні через не ідеальність диференціальних систем. Відлунні сигнали

проявляються у вигляді прослуховування абонентом своєї розмови, затриманої на час, що дорівнює подвоєному часу поширення сигналу між абонентами. Це залежить від того, що для проходження відстані сигналу потрібен час.

$$t = \frac{L}{c} = \frac{2H}{c}, \quad (1.1)$$

де L - довжина лінії зв'язку від земної станції до іншої земної станції, яка проходить через супутник; c - швидкість світла; H - відстань від супутника до поверхні Землі. Звідси випливає, що при $H = 36000$ км величина запізнювання складе приблизно 250 мілісекунд. Запізнення сигналу при передачі дуплексних телефонних розмов призводить до появи вимушених пауз в розмові, втрати "контакту" між абонентами, тобто обмежує природність бесіди.

Для систем зв'язку, що використовують супутники, що рухаються по орбітах з висотою 36000 кілометрів (тобто для геостаціонарних супутників) значення затримки ехосигналів може бути рівним 500 мілісекунд. У цих випадках слід забезпечити загасання ехосигналів до величини, що дорівнює приблизно 60 дБ щодо рівня корисного сигналу.

Однією з особливостей систем зв'язку через ШСЗ є виникнення ефекту Доплера, що викликаний рухом супутника щодо ЗС. Позначимо через V ту компоненту швидкості руху ШСЗ, яка збігається з лінією радіозв'язку ШСЗ - ЗС і домовимося вважати величину V негативною в разі зменшення відстані між ШСЗ і ЗС і позитивною при збільшенні цієї відстані.

Відомо, що при русі джерела сигналу зі швидкістю $\pm V$ частота прийнятих коливань пов'язана з частотою випромінюваних коливань наступним співвідношенням

$$f = f_0 \left(1 \pm \frac{V}{c} \right), \quad (1.2)$$

де f - частота прийнятих коливань; f_0 - частота випромінюваних коливань;

V – швидкість руху ШСЗ; c – швидкість світла.

Найбільш сильно ефект Доплера буде проявлятися в системах зв'язку, що використовуються не геостаціонарні орбіти. У системах зв'язку з геостаціонарними ШСЗ ефект Доплера може мати місце при корекції положення супутника на орбіті.

Відзначимо, що ефект призводить не тільки до зміни частоти випромінюваних коливань, а отже, і несучої частоти, а й викликає деформацію спектра переданого повідомлення. Верхні частоти в спектрі будуть змінюватися на велику величину, а ширина спектра прийнятого коливання буде відрізнятися від ширини спектра модульованих коливань [9].

1.5 Діапазони робочих частот систем зв'язку через ШСЗ

Питаннями розподілу смуг частот між різними службами радіозв'язку займається одна із спеціалізованих організацій ООН - Міжнародний союз електрозв'язку, який на базі досліджень, проведених в країнах - членах МСЕ і подаються Міжнародній консультативній комітеті по радіо, на своїх адміністративних конференціях розробляє відповідні регламентують правила і процедури. Основним міжнародним документом, який регламентує використання частот, є Регламент радіозв'язку, що містить таблицю розподілу смуг частот між службами, окремі технічні обмеження, що накладаються при спільному використанні частот різними службами, процедури координації систем, а також правила реєстрації частотних присвоєнь в Міжнародному комітеті реєстрації частот [10].

Вибір смуг частот, що виділяються для роботи систем зв'язку через ШСЗ, визначається наступними основними умовами:

- особливостями поширення електромагнітних коливань через атмосферу;
- інтенсивністю шумів, викликаних радіовипромінювання різних зовнішніх джерел (Сонце, Місяць, планет, атмосфери Землі та інших);

- можливістю роботи систем зв'язку через ШСЗ в виділених смугах частот спільно з іншими радіослужбами при допустимих значеннях радіоперешкод.

Згідно регламенту радіозв'язку, для району 1 (Європа, РФ, Африка) фіксованої супутникової служби, до якої відносяться системи зв'язку через ШСЗ, відводяться наступні смуги частот (у діапазоні до 40 ГГц):

- для передачі повідомлень на ділянці повідомлень Земля – ШСЗ 5.725...7.075; 7.9...8.4; 12.5...13.25; 14.0...14.8; 27.5...31.0 ГГц;

- для передачі повідомлень на ділянці повідомлень ШСЗ – Земля 3.4...4.2; 4.5...4.8; 7.25...7.75; 10.7...11.7; 12.5...12.75; 17.7...21.2; 37.5...40.5 ГГц.

Слід зазначити, що найкращими смугами частот для систем зв'язку через ШСЗ є частоти в діапазоні 2 ... 8 ГГц [9].

В таблиці 1.2 зведено використання різних радіочастотних діапазонів в різноманітних супутникових системах зв'язку.

Таблиця 1.2

Смуги частот систем супутникового зв'язку

Позначення смуги	Діапазон частот (ГГц)	Приклади систем	Типове використання
P	0.23 - 1.00	Orbcomm, E-SAT	Пейджинг, визначення місцезнаходження
L	1.53 - 2.70	Iridium, Globalstar, ICO, Thuraya	Телефонія, мобільний зв'язок, пейджинг, низькошвидкісна передача даних
S	2.70 - 3.50	Globalstar	Телефонія, мобільний зв'язок, пейджинг, низькошвидкісна передача даних
C	3.70 - 6.50	Intelsat, Skynet	Фіксований зв'язок, передача відео, VSAT-застосування
X	7.25 - 8.50	-	-

Продовження таблиці 1.1

Смуги частот систем супутникового зв'язку

Позначення смуги	Діапазон частот (ГГц)	Приклади систем	Типове використання
Ku (Європа)	11.0 - 14.0	Direct TV, Echostar, Astra	Фіксований зв'язок, ТВ, передача даних, мобільний зв'язок, широкополосний зв'язок, доступ до Інтернет
Ku (США)	11.0 - 17.8	Spaceway, Cyberstar, Astrolink, Teledesic	
Ka	17.7 - 30.5	Teledesic, Skybridge, Cyberstar	Широкополосний зв'язок, високошвидкісна передача даних, доступ до Інтернет
V	31.0 - 70.0	Milstar, AFSATCOM, USTS	Військові застосування

Ширина смуги супутникового каналу характеризує кількість інформації, що він може передати в одиницю часу. Типовий супутниковий прийомопередавач має ширину смуги 36 МГц на частотах від 4 МГц до 6 МГц. Таких прийомопередавачів на супутнику встановлюється від 12-24, що дає в результаті від 432 до 864 МГц.

Як вже згадувалося, смуги частот супутника зв'язку вказуються у парах. Наземна станція передає сигнал на супутник на більш високій частоті (Uplink), а приймає на більш низькій (Downlink).

Сучасні супутникові системи найчастіше застосовують одну з двох смуг: С-смугу (від супутника до наземної станції в області 6 ГГц і назад в області 4 ГГц), чи Ku-смугу (14 ГГц і 12 ГГц, відповідно). Ширина будь-якої полоси складає 500 МГц.

Ka-смуга (2.5 ГГц у діапазоні від 30 до 120 ГГц) використовується для зв'язку між супутниками, а також між супутником і наземними станціями [11].

2 ПОСЛУГИ ПО БАГАТОПРОМЕНЕВИМ НЕНАЗЕМНИМ МЕРЕЖАМ З ПІДТРИМКОЮ 5G NR

2.1 Мережі радіодоступу для NR NTN

NTN на основі 5G New Radio (NR) була основним напрямком [12]. NR був розроблений для прямої сумісності, підтримки низької затримки, передових антенних технологій та гнучкості спектру, включаючи роботу в діапазонах низьких, середніх та високих частот. Це забезпечує міцну основу адаптації NR для підтримки NTN.

Зростає інтерес до варіантів використання масового Інтернету речей (IoT) на основі NTN з використанням вузькосмугового IoT (NB-IoT) та довгострокового розвитку (LTE) для зв'язку машинного типу (LTE-M). В результаті 3GPP вивчає можливість адаптації NB-IoT та LTE-M для підтримки NTN у своїй версії 17 [13].

У роботі [14] обговорюються проблеми та можливості NTN, а також представлений практичний приклад використання частот міліметрового діапазону для підключення мобільних терміналів. Детальний огляд NTN представлений у [15], але обговорення роботи 3GPP NTN у ньому залишається високому рівні. Натомість, мета цієї статті – проаналізувати варіанти роботи NTN, заглибившись у детальні аспекти та фундаментальні обґрунтування застосування технологій, що впливають на стандартизацію. Зокрема, у цьому документі обговорюються ключові рішення NTN, що охоплюють безліч областей, від мережі радіодоступу до послуг та системних аспектів до ядра та терміналів.

Робота над NR NTN розпочалася у 2017 році з дослідження, присвяченого сценаріям розгортання та моделям каналів [16]. Першою основною метою дослідження було вибрати кілька еталонних сценаріїв розгортання NTN та узгодити ключові параметри, такі як архітектура, висота орбіти, смуги частот тощо.

Ключові сценарії та моделі включають:

- використання S- та Ka-діапазонів;
- супутники GEO, супутники LEO та HAPS;
- спрямовані до Землі промені (тобто промені, які прямують на ділянку землі якомога довше) і промені, що рухаються (тобто промені, що рухаються по поверхні Землі слідом за рухом супутника);
 - типові розміри зони обслуговування та мінімальні кути місця (елевації) для розгортань GEO, LEO та HAPS;
 - два типи терміналів NTN: портативні термінали та термінали з дуже малою апертурою (VSAT) (оснащені параболічними антенами і зазвичай встановлюються на будівлях або транспортних засобах);
 - моделі антени для супутникової антени та антени HAPS.

Друга основна мета дослідження полягала у аналізі моделей каналів NTN з урахуванням моделей наземних каналів. Різні моделі каналів підтримують низку сценаріїв розгортання, включаючи міські, приміські та сільські.

Багатопроменевість - типове явище в умовах наземного поширення. Для NTN велика відстань до супутника призводить до того, що різні траєкторії майже паралельні, і кутовий розкид, таким чином, близький до нуля. Тому великомасштабні параметри (імовірність прямої видимості, кутовий розкид, розкид затримок тощо.) відрізняються від наземного випадку і залежить від кута місця обслуговуючого супутника.

Основна мета полягає у визначенні мінімального набору необхідних функцій, що забезпечують підтримку з наземних NR для NTN (особливо для супутникових мереж), що включало архітектуру, протоколи вищого рівня та аспекти фізичного рівня.

RAN наступного покоління (NG-RAN) підтримує поділ базової станції 5G (gNB) на центральний блок (CU) та розподілений блок (DU). Досліджено безліч варіантів архітектури NG-RAN на основі NTN та зроблено висновок, що немає жодних перешкод підтримки зазначених варіантів архітектури.

Стек протоколів верхнього рівня NR поділено на площину користувача

(UP), яка керує передачею даних, та площину управління (control plane, CP), що відповідає за сигналізацію. Для UP основний вплив мають тривалі затримки поширення в NTN.

Відповідно, було вивчено вплив тривалих затримок на управління доступом до середовища (medium access control, MAC), управління радіоканалом (radio link control, RLC), протокол конвергенції пакетних даних (packet data convergence protocol, PDCP) та протокол адаптації службових даних (service data adaptation protocol, SDAP). Було зроблено висновок, що вдосконалення MAC будуть потрібні для довільного доступу, переривчастого прийому (discontinuous reception, DRX), запиту планування та автоматичного гібридного запиту на повторення (hybrid automatic repeat request, HARQ). Було рекомендовано зосередити увагу на повідомленні про стан та порядкові номери на рівні RLC, а також на відкиданні одиниць службових даних та порядкових номерах на рівні PDCP. Було виявлено, що для SDAP немає необхідності вносити зміни для підтримки NTN.

Для CP основна увага в дослідженні приділялася процедурам управління мобільністю через переміщення платформ NTN, особливо супутників LEO. Для режиму очікування потрібно ввести специфічну системну інформацію NTN.

З погляду фізичного рівня, великі оцінки каналного та системного рівнів проводилися у двох номінальних смугах частот: діапазонах S та Ka. З аналізу можна зробити висновок, що при відповідних схемах розташування супутникових променів портативне обладнання (UE) може обслуговуватися мережами LEO і GEO в S-діапазоні, а інше UE з високим коефіцієнтом підсилення передавальної та приймальної антен терміналу (VSAT) і UE, можуть обслуговуватися LEO і GEO як в S-, так і в Ka-діапазонах [16, 18].

Наземні мережі NR утворюють хорошу основу для підтримки NTN, незважаючи на проблеми, пов'язані з тривалими затримками поширення, великими доплерівськими зсувами і рухомими об'єктами в NTN. Було визначено, що необхідні удосконалення в областях часових співвідношень, часової та частотної синхронізації висхідної лінії зв'язку та HARQ.

Мета останніх досліджень полягає у визначенні покращень, необхідних для

NTN на базі LEO та GEO, а також націлити на неявну підтримку HAPS та мереж "повітря-земля". Це включає аспекти фізичного рівня, протоколи та архітектуру, а також управління радіоресурсами, вимоги до радіочастот та використання смуги частот. Основна увага приділяється прозорій архітектурі корисного навантаження з фіксованими наземними зонами та системами дуплексного зв'язку із частотним розподілом (FDD), де передбачається, що всі UE мають можливості глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS).

На рис. 1 показано архітектуру NTN з прозорим корисним навантаженням. Базова мережа 5G (5GC) підключається до gNB за допомогою NG-інтерфейсу. GNB розташований на землі та підключається до шлюзу NTN, який через фідерне з'єднання підключається до корисного навантаження NTN (мережевий вузол, встановлений на борту супутника або HAPS). Корисне навантаження NTN підключається до UE через службове посилення за допомогою інтерфейсу Uu.

Наземний користувач UE з можливостями GNSS може розрахувати відносну швидкість між UE та супутником, а також час прийому-передачі (round-trip time, RTT) між UE та супутником. Виходячи з відносної швидкості, UE може розрахувати та застосувати попередню компенсацію для доплерівської частоти, щоб гарантувати, що його сигнал висхідної лінії зв'язку приймається на супутнику або gNB на бажаній частоті. GNB надає UE загальне випередження синхронізації (timing advance, TA), яке сигналізує RTT між супутником та gNB. UE додає час RTT між UE та супутником до загальної TA, щоб отримати повну TA. Повний TA використовується як зсув між прийнятою синхронізацією низхідної лінії зв'язку і синхронізацією передачі висхідної лінії зв'язку в UE, тобто, якщо слот n низхідній лінії зв'язку починається в момент часу t_1 , то слот n висхідної лінії зв'язку починається в момент часу t_1 мінус повне TA. Це дозволяє UE відправляти передачі по висхідній лінії зв'язку з точною синхронізацією прийому gNB як для довільного доступу, так і для передачі даних в підключеному режимі.

Передачі в NR засновані на 16 процесах HARQ із зупинкою та очікуванням для безперервних передач. Процес HARQ не може бути повторно використаний для нової передачі, доки не буде отримано зворотний зв'язок для попередньої

передачі. При тривалих RTT та використанні протоколу зупинки та очікування передачі зупинятимуться, коли всі процеси HARQ очікують зворотного зв'язку, що знижує пропускну здатність зв'язку. Щоб зменшити зрив, кількість процесів HARQ збільшена до 32, що може охоплювати деякі сценарії "повітря-земля". Однак 32 процесів HARQ недостатньо для покриття RTT NTN на основі LEO та GEO. Оскільки подальше збільшення кількості процесів HARQ вважається небажаним, необхідно використовувати схеми для повторного використання того самого процесу HARQ до того, як пройде повний RTT, щоб уникнути зупинки. При повторному використанні процесу HARQ для передачі по низхідній лінії зв'язку до того, як пройде RTT, зворотний зв'язок HARQ стає непотрібним і таким чином відключається. Для висхідної лінії зв'язку немає зворотного зв'язку HARQ, і gNB може динамічно вирішувати, чи повторно використовувати процес HARQ до того, як пройде RTT, відправивши гранти для нових даних або гранти для повторних передач, або дочекатися, поки він не декодує передачу по висхідній лінії. Показано, щоб реалізувати в реальному часі RTT NTN для UE необхідно (повторно) вибрати новий супутник, який заснований на існуючих критеріях і може включати нові критерії, такі як час, коли супутник перестав покривати зону, де знаходиться UE. Умовна передача обслуговування заснована на місцезнаходженні UE та синхронізації супутникового покриття з місцем розташування UE.

2.2 Послуги та системні аспекти NR NTN

У дослідженні, задокументованому в [17], визначено варіанти використання супутників, що використовуються як технології доступу від UE, так і як транзитного каналу між наземною базовою станцією (BS) і мережею між BS (англ. core network, CN). Для супутникового доступу UE варіанти використання включають, наприклад, використання супутника для широкомовної послуги, щоб гарантувати покриття для пристроїв IoT і забезпечити критично важливий доступ

у надзвичайних ситуаціях. Для сценаріїв супутникового зворотного зв'язку варіанти використання включають, наприклад, фіксований зворотний зв'язок між BS у віддаленій області і CN, а також зворотний між рухомою BS, розгорнутої в поїзді, і CN.

Вимоги охоплюють супутниковий доступ на основі NTN RAN для доступу, так і варіанти використання транзитного з'єднання, а також можливість використання супутникових радіотехнологій. Сучасні наземні системи зазвичай розгортаються таким чином, що вони забезпечують покриття лише в межах однієї країни, виконуючи відповідні нормативні зобов'язання цієї конкретної країни. Однак, супутникові радіосистеми можуть охоплювати кілька країн або міжнародні води. Дослідження архітектурних аспектів використання супутникового доступу 5G полягає у вивченні впливу підтримки супутникового доступу та транзитного з'єднання в системах 5G з метою повторного використання існуючих рішень. Ядро мереж 5G (5GC) передбачає фіксовані наземні зони спостереження (tracking areas, TAs), і навіть те, що ідентифікатори (ID) стільників застосовуються для конкретних географічних зонах. Ідентифікатори TAs та ідентифікатори стільників використовуються в 5GC і на рівні послуг як інформація про місцезнаходження UE. Припускаючи, що наземні фіксовані TAs і що NTN RAN повідомляють ідентифікатори стільників, які можуть бути зіставлені з географічними областями, це гарантує, що 5GC і рівень послуг можуть продовжувати використовувати ідентифікатори UE, навіть якщо вони рухаються.

Потенційно широке охоплення супутниковими радіосистемами у багатьох країнах є проблемою, коли справа доходить до виконання нормативних вимог. Функція управління доступом та мобільністю (access and mobility management function, AMF) може потребувати перевірки того, що UE знаходиться в зоні (країні), яку AMF може обслуговувати, як показано на рисунку 2.1. Перевірка може здійснюватися за допомогою RAN.

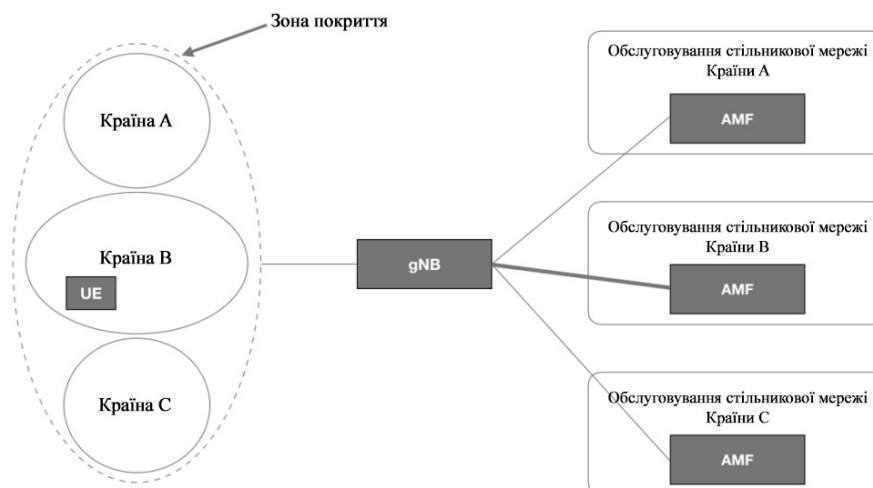


Рис. 2.1. Супутниковий доступ, що охоплює декілька країн та gNB, підключений до стільникових мереж, що обслуговують різні країни.

Структура якості обслуговування (QoS) 5G має бути повторно використана з невеликими покращеннями. Зокрема, при використанні супутника GEO супутникове з'єднання може робити значний внесок у наскрізну затримку, яка в багатьох випадках може виходити за межі того, що сьогодні дозволено стандартизованими класами QoS 5G. Ймовірно, знадобиться деяке коригування існуючих класів QoS 5G або визначення нових класів QoS 5G.

Одним із рішень є технологія доступу, що використовується UE (наприклад, LTE або WiFi). Щоб зробити це можливим для різних типів супутників NR NTN (LEO, MEO, GEO), а також дозволити диференціацію з наземним NR. Це дозволить мережевим функціям 5GC керувати сеансом, політичними регламентами, нарахуванням оплати, а також на рівні обслуговування (AF) знати, коли UE використовує супутниковий доступ.

У 2019 році SA5 розпочала дослідження аспектів управління та оркестрування з інтегрованими супутниковими компонентами у мережі 5G [8]. Основна мета – вивчити бізнес-ролі, а також послуги, управління мережею та оркестрування мережі 5G з інтегрованими супутниковими компонентами. Об'єм включає супутниковий доступ на основі NTN RAN, так і супутниковий доступ, не

пов'язаний з 3GPP, а також аспекти транзитного з'єднання. Мета полягає в тому, щоб повторно використовувати існуючу бізнес-модель, управління та оркестрування поточної мережі 5G, щоб мінімізувати вплив.

Результат дослідження задокументований у [18], який включає варіанти використання, а також потенційні вимоги та рішення, наприклад, для управління та моніторингу компонентів gNB та управління мережевим сегментом. Порівняно з наземним NR, впливи в основному відбуваються через сценарії LEO/MEO, де компоненти gNB, такі як gNB-DU, розташовані на борту супутникових апаратів і, таким чином, будуть переміщатися щодо Землі. Інші покращення необхідні через тривалі затримки, які впливають на деякі функції моніторингу та ключові показники ефективності. Для покращення ефективності запропоновано концепції мереж, що самоорганізуються (self organizing network, SON) для 5G необхідно, а також обробка вимірювань робочих характеристик, які використовують процес HARQ, що може бути недоступний при використанні супутникової RAN. Крім того, функції моніторингу, що підтримують використання балансування навантаження між різними радіотехнологіями, повинні бути розширені, щоб охопити балансування навантаження між наземною RAN та не наземною RAN.

2.3 Багатопроменева модель NTN 5G NR

Покращення технології виробництва супутників в поєднанні зі зростаючим попитом на послуги в будь-який час і в будь-якому місці привертають увагу операторів зв'язку і дослідницьких організацій до рішень NTN, які будуть інтегровані з системами 5G NR. 5G NTN [19] покликаний забезпечити більш широку зону покриття, поліпшити безперервність обслуговування як для масових пристроїв зв'язку, так і для користувачів, які подорожують на рухомих платформах, а також допомогти забезпечити доступність послуг в критично важливих випадках використання (наприклад, стихійні лиха, відновлення після збоїв і громадська безпека). Крім того, 5G NTN може підвищити масштабованість мережі за рахунок надання послуг багатоадресної та ширококомовної передачі,

тобто вдосконаленою служби мультимедійної широкомовної та багатоадресної передачі (eMBMS) [20].

В останні роки дослідницьке співтовариство в галузі телекомунікацій було особливо зацікавлене в дослідженні багатопромених NTN (тобто HTS) [21]. У таких системах частоти повторно використовуються серед променів, а доступні смуги частот залежать від коефіцієнта повторного використання частот, який визначає, скільки і які набори частот повторно використовуються в променях. Коефіцієнти повторного використання частоти: один (тобто, схема повторного використання повної частоти), два (тобто чотириколірна схема повторного використання частоти) або три (тобто триколірна схема повторного використання частоти) є доступними варіантами 3GPP [22].

Очікується, що в наступні роки багатопромених NTN будуть відігравати вирішальну роль в забезпеченні eMBMS через їх здатності досягати більш високих швидкостей передачі даних. Більш того, eMBMS також надаватиметься в одночастотному режимі (MBSFN [23]) з попередньою мережевою синхронізацією. Багатопромених NTN і MBSFN демонструють важливі переваги, революцію традиційних стільникових мереж та традиційний режим передачі «точка-точка» (PTP), відповідно [24].

У існуючій літературі розглядаються різні ключові підходи (тобто методи RRM та попереднього кодування) для обмеження міжпромених перешкод у приймачах NTN через ненульові бічні пелюстки діаграм спрямованості випромінювання. У цій роботі ми пропонуємо інше рішення для зменшення перешкод між терміналами NTN на краях променя шляхом використання одночасних передач MBSFN серед синхронізованих променів одного і того ж супутника для доставки заданого контенту одним і тим же радіоресурсами. Отже, кілька форм сигналів, що належать різним променям, розглядаються як джерело конструктивних перешкод приймача NTN.

Наскільки нам відомо, підхід MBSFN раніше не розглядався для багатопромених супутникового зв'язку. Таким чином, у цій роботі ми визначаємо концепції передачі променя MBSFN, області променя синхронізації

(SBA) та області променя MBSFN (MBA), на основі яких ми розробляємо новий алгоритм формування MBA, спрямований на збільшення ADR у багатопроменевій NTN системи. У кожному MBA промені синхронізуються в часі для доставки одного й того самого потоку eMBB до кількох терміналів NTN за одними й тими радіоресурсами (тобто передача MBSFN1 виконується кількома променями).

Ми пропонуємо метод розподілу радіоресурсів, який дозволяє уникнути міжпроменевих перешкод при доставці кількох елементів контенту. Ми враховуємо мобільність терміналів NTN і, отже, зміни якості каналу у часі. Оскільки жодна з пропозицій не готова до систем 5G NR, ми адаптуємо нашу модель системи з урахуванням технології 5G NR.

Пропонована схема SF-MBT спрямована на ефективний розподіл радіоресурсів для забезпечення вищого ADR у багатопроменевій системі NTN порівняно зі схемами повторного використання частот. Для досягнення цієї мети наш алгоритм SF-MBT використовує концепцію MBSFN серед променів одного і того ж GEO-супутника шляхом синхронізації (у часі) передачі променів при доставці однієї і тієї ж послуги eMBB з використанням одного і того ж набору RB. Параметри передачі променя MBSFN встановлюються відповідно до найнижчої MCS (тобто найбільш стійкої модуляції), що підтримується всіма терміналами NTN, зацікавленими в цьому контенті eMBB.

Принцип роботи запропонованої схеми полягає в тому, щоб згрупувати промені, що належать SBA GEO-супутнику, у декілька MBA для кожного контенту, таким чином, беручи до уваги інтереси NTN. Коли промінь належить виключно одному MBA або незалежному MBA, всі термінали NTN в зоні дії цього променя зацікавлені в тому самому контенті, тоді як коли промінь належить двом або більше MBA, він повинен доставляти два або більше елемента контенту.

Для останнього контексту ми визначаємо перекриваються MBA як два або більше MBA, які спільно використовують принаймні один промінь. У разі перекриття MBA схема SF-MBT виконує розподіл радіоресурсів за задіяними MBA, щоб уникнути міжпроменевих перешкод. Крім того, схема SF-MBT покращує ADR системи, задовольняючи обмеження обслуговування всіх

зацікавлених терміналів NTN.

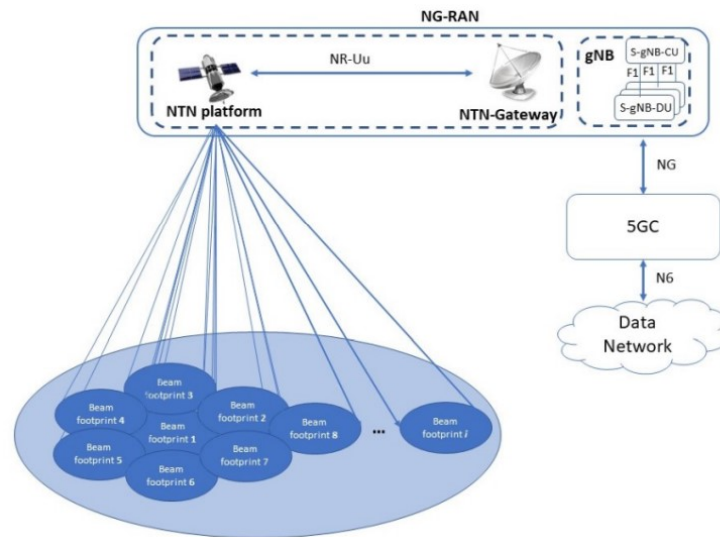


Рис. 2.2. Еталонна архітектура для багатопроменевої передачі в одночастотному режимі.

Як еталонну платформу NTN ми розглядаємо супутник GEO (GEO-sat), що працює в частоті S-діапазону (тобто 2 ГГц). Наземним компонентом GEO-sat є GEO-gNB, який відповідає за процедури адаптації каналу. Зокрема, GEO-sat збирає та пересилає весь зворотний зв'язок з інформацією про статус каналу від терміналів NTN у GEO-gNB, який вибирає відповідну схему модуляції та кодування (MCS) для доставки заданого контенту eMBB у декілька пунктів призначення.

Зворотний зв'язок терміналів NTN передається фідерним каналом, який позначається як канал від терміналів NTN до GEO-gNB. Дані eMBB передаються через службовий канал, який позначається як канал NTN-gNB до терміналів NTN. Затримка приймання-передачі (RTD) - це час, необхідний сигналу для проходження від терміналу NTN до NTN шлюзу і назад (або навпаки). Для супутника на основі корисного навантаження RTD зазвичай дорівнює 541,46 мс [22].

Розглянута багатопроменева система NTN заснована на технології 5G NR, яка підтримує кілька масштабованих нумерологій мультиплексування з

ортогональним частотним поділом (OFDM) ($\mu =$ від 0 до 4), кожна з яких характеризується своїм рознесенням піднесучих (SCS, від 15 кГц до 240 кГц) наступного рівняння [19]:

$$SCS = 15kHz \times 2^\mu, \quad (2.1)$$

де μ – нумерологічний індекс.

Передача NR заснована на OFDM з циклічним префіксом (CP-OFDM) у низхідній лінії зв'язку, тоді як у висхідній лінії зв'язку підтримуються як CP-OFDM, так і OFDM з дискретним перетворенням Фур'є з розширенням спектра (DFT-OFDM) з CP. Передачі по низхідній та висхідній лініях зв'язку NR організовані в кадрах, кожен із яких складається з субкадрів тривалістю в 1 мілісекунду. Кожен підкадр має різну кількість слотів відповідно до обраної нумерології. Управління радіочастотним спектром здійснюється за допомогою блоків ресурсів (RB), кожен з яких складається з 12 послідовних та рівномірно рознесених піднесучих. У цій роботі ми посилаємося на термінали NTN, зацікавлені у послугах eMBB; отже, ми вибираємо нумерологію $\mu = 0$ з $SCS = 15$ кГц, яка є найбільш підходящою для додатків eMBB, які доставляють через eMBMS.

Ми визначаємо зону синхронізації променя (SBA) як зону покриття GEO-sat, де можуть бути сформовані один або кілька MBA. Ми визначаємо зону променя MBSFN (MBA) як область, що відповідає двом або більше сусіднім променям, де відповідні промені синхронізуються в часі для доставки одного і того ж потоку контенту по одним і тим же радіоресурсам в декілька пунктів призначення, виконуючи передачу променя MBSFN. Ми позначаємо M як набір всіх MBA, включених до SBA, а E – це набір всього вмісту eMBB, запрошеного до SBA. Нехай T буде набором усіх терміналів NTN, які зацікавлені у широкомовному обслуговуванні вмісту eMBB:

$$|T| = \sum_{m \in M} |T_m|, \quad (2.2)$$

де T_m - набір терміналів NTN, що належать m -му МВА.

Ми позначаємо RB як набір доступних радіоресурсів (тобто терміни RB). Нехай RB_m буде кількістю RB , призначених для променів m -го МВА. Загальна кількість RB , що виділяються m -му МВА, не повинна перевищувати кількість доступних RB :

$$|RB_m| \leq |RB|, \forall m \in M, \quad (2.3)$$

Якщо одна або кілька зон охоплення променя належать кільком МВА, сума RB , призначених променям цих МВА, не повинна перевищувати кількість доступних RB , щоб уникнути міжпроменевих перешкод:

$$\sum_{m \in M} |RB_m| \leq |RB|, \quad (2.4)$$

Метою пропонованої схеми RRM є збільшення загальної ADR багатопроменевої системи NTN шляхом задоволення вищезазначених обмежень при виконанні адаптації каналу з динамічним вибором рівня MCS для передачі променя MBSFN у відповідності з інформацією зворотного зв'язку CSI, надісланої через всі термінали NTN до GEO-sat. Посилаючись на SBA як на набір M МВА, ADR визначається так:

$$ADR = \sum ADR_m, \quad (2.5)$$

де ADR терміналів NTN, що приймають контент m -м МВА за допомогою передачі променя MBSFN, представлений як:

$$ADR_m = \sum_{t \in T} Rate(t) \times |RB_m|, \forall_m \in M, \quad (2.6)$$

де $Rate(t)$ - це мінімальна швидкість передачі даних на RB, що відноситься до t -го терміналу NTN з найнижчим MCS з усіх терміналів NTN в m -му MBA.

Схема SF-MBT (одночастотна багатопроменева передача) для широкомовної передачі послуг eMBB за допомогою синхронних передач у багатопромених системах NTN 5G NR. Підхід SF-MBT передбачає, що промені одного і того ж супутника згруповані в різні MBA (MBSFN Beam Areas), де всі промені синхронізуються в часі для одночастотної передачі певної послуги за одними і тими ж радіоресурсами. MBA можуть бути незалежними або перекриваються: незалежний MBA складається з променів, по яких доставляється тільки один контент, тоді як перекриваються MBA включають принаймні один промінь, що належить більшій кількості MBA, кожен з яких доставляє різні елементи контенту [25].

3 СЦЕНАРІЇ РОЗГОРТАННЯ NTN МЕРЕЖ

3.1 Сценарій розгортання NTN за допомогою низькоорбітальних угруповань

У мережах супутникового зв'язку використовуються космічні платформи, які включають супутники на низькій навколоземній орбіті (LEO), супутники на середній навколоземній орбіті (MEO) та супутники на геостаціонарній навколоземній орбіті (GEO).

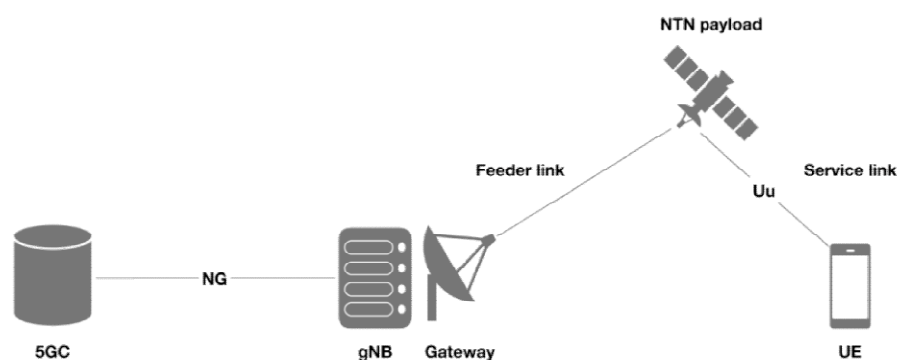


Рис. 3.1. Архітектура NTN із прозорим корисним навантаженням.

За останні кілька років світ став свідком відродження інтересу до широкопasmового зв'язку, що надається мережами LEO NTN із великими супутниковими угрупованнями (наприклад, Starlink, Kuiper та OneWeb). Щоб отримати вигоду від масштабу системи 5G [26] супутникова індустрія підключилася до процесу 3GPP для інтеграції супутникових мереж в систему 5G NR (нова технологія стільникового зв'язку). HAPS - це повітряні платформи, які можуть включати літаки, повітряні кулі і дирижаблі. У технології NTN основна увага приділяється станціям із висотною платформою, таким як базові станції міжнародного мобільного зв'язку, відомі як HABS (англ. high-altitude platform stations as IMT base stations). Система HABS надає послуги мобільного зв'язку в

тих же смугах частот, що і наземні мобільні мережі.

Мережі "повітря-земля" призначені для забезпечення зв'язку в польоті для літаків за рахунок використання наземних станцій, які відіграють ту саму роль, що й базові станції (BS) у наземних мобільних мережах. Але антени наземних станцій у мережі "повітря-земля" спрямовані до неба, і відстані між положеннями станцій набагато більші, ніж у наземних мобільних мереж.

Досі робота NTN була зосереджена на мережах супутникового зв'язку з неявною сумісністю для підтримки систем HABS та мереж "повітря-земля". Варто відзначити, що система також працює із маловисотними літальними безпілотними апаратами з мобільними пристроями (БПЛА, також відомими як безпілотні літальні апарати), які можна розглядати як частину сімейства NTN в широкому сенсі. Однак у 3GPP цей напрямок роботи було проведено в окремому напрямку. Тому тут ми зосередимося на мережах супутникового зв'язку і зведемо до мінімуму обробку інших типів NTN.

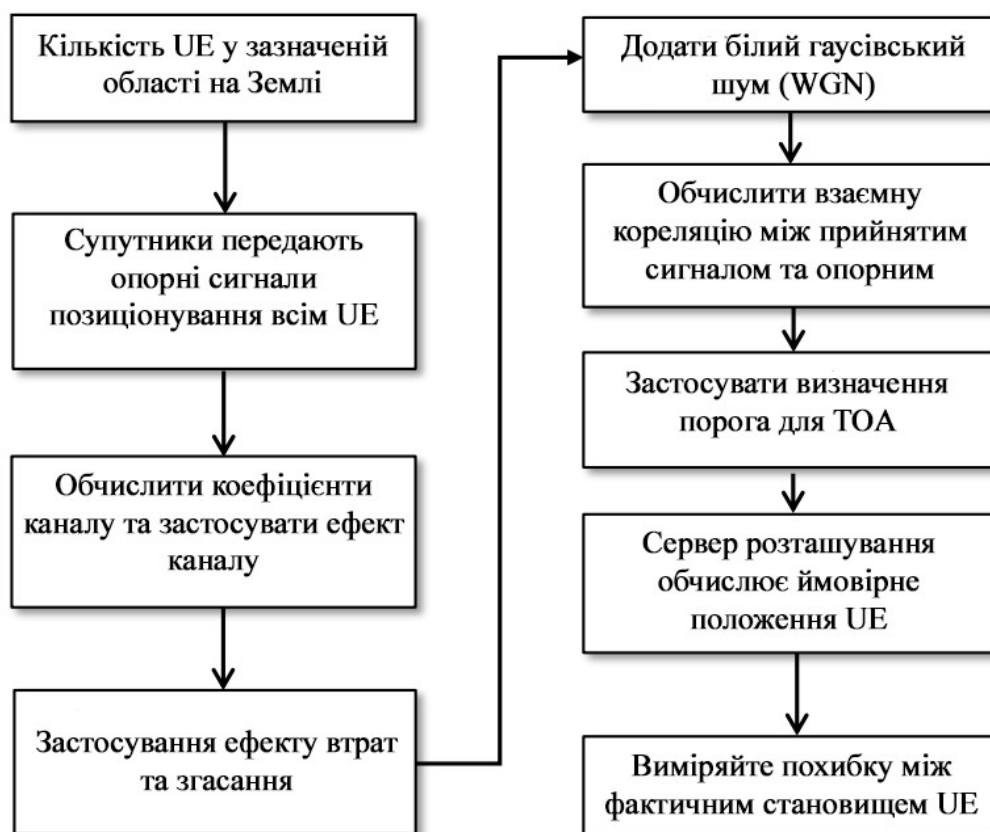


Рис. 3.2. Процедура симуляції розгортання мережі

У цьому розділі описується реалізований симулятор. На рисунку 3.2 показано блок-схему процедури симулятора. Спочатку UE випадковим чином скидаються у зоні, покритій кількома супутниками. У цій області кут місця між кожним UE та кожним супутником становить від 30 до 90 градусів. Потім супутники транслюють опорні сигнали позиціонування на UE. Потім слід обчислення коефіцієнтів каналу та ефектів каналу програми. В імітатор вбудовані дві моделі каналів: модель великого завмирання і модель швидкого завмирання. Також додається ефект втрат на трасі та згасання в тіні, і розраховується відношення несуча/шум (CNR). Крім того, до сигналу додається гауссовський білий шум (WGN).

UE приймає переданий сигнал після застосування каналу та обчислює кореляцію між прийнятим сигналом та опорним сигналом. Потім він обчислює TOA першого шляху, використовуючи метод, що базується на порозі. Нарешті, сервер позиціонування обчислює оцінку положення UE з використанням оцінювача максимальної правдоподібності (MLE).

Як еталонне супутникове угруповання використовується угруповання Starlink Phase I. Це сузір'я надає інтернет-послуги з високою швидкістю і низькою затримкою для користувачів у всьому світі, навіть у районах, що недостатньо обслуговуються. Це робить його одним із найцікавіших сузір'їв сьогодні. Сузір'я Starlink Phase I, як показано на рисунку 10 складається з 24 площин. У кожній площині 66 супутників, що у сумі дає 1584 супутники, що покривають всю Землю. Супутники – супутники LEO на висоті 550 км. Орбіти нахилені на 53° по відношенню до екватора, а відстань між орбітальними площинами дорівнює 15° [27].

Моделювання у цій роботі зосереджено для певної області Землі. Ця область має форму кола з радіусом, що дорівнює 850 км, як показано на рисунках 3.3 та 3.4. Ця область покрита 9 супутниками двох різних орбітах. 9 супутників розділені на 5 супутників на першій орбіті та 4 супутники на другій орбіті. Перша орбіта нахилена на 2° , а друга орбіта нахилена на 17° .

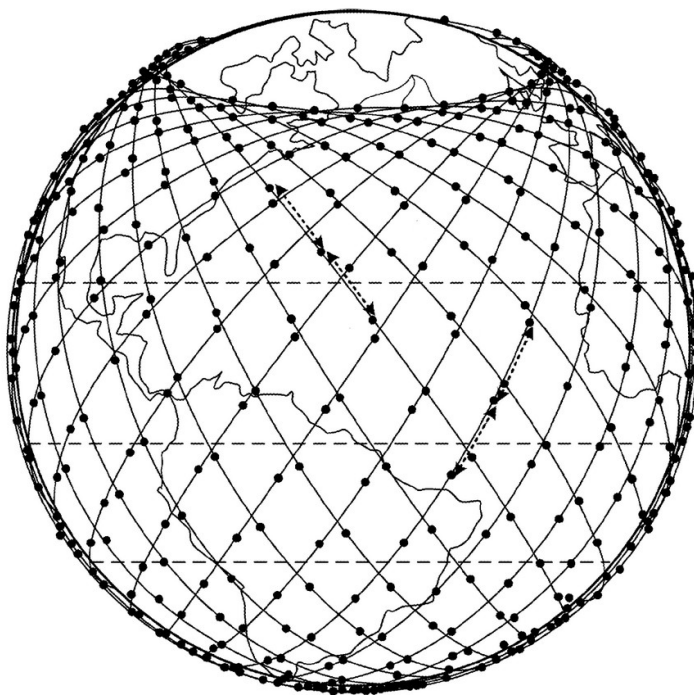


Рис. 3.3. Сузір'я StarLink Phase I

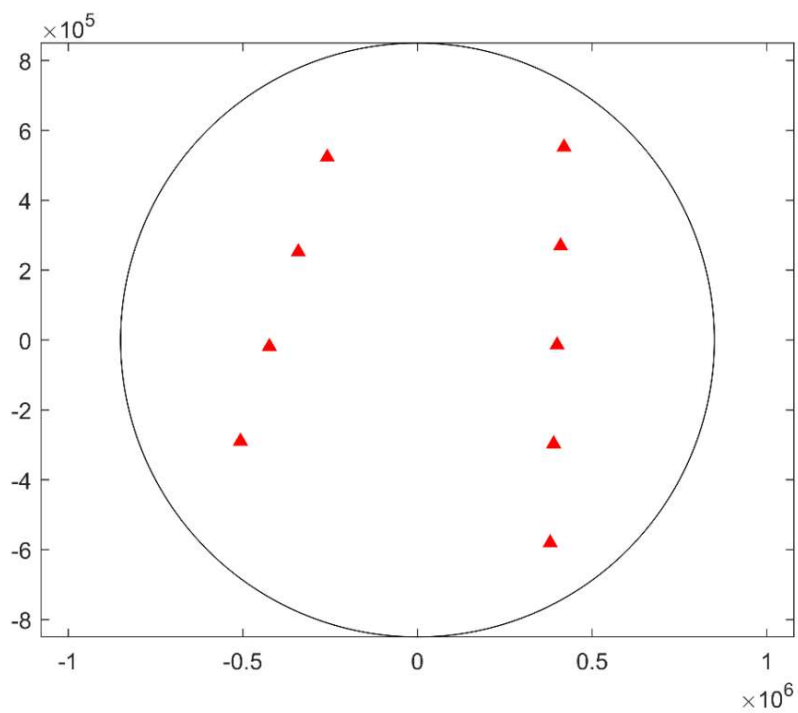


Рис. 3.4. Планування місцевості Землі

Кожен супутник випромінює 19 променів, утворюючи 19 зон охоплення променя Землі, як показано на рисунку 3.5.

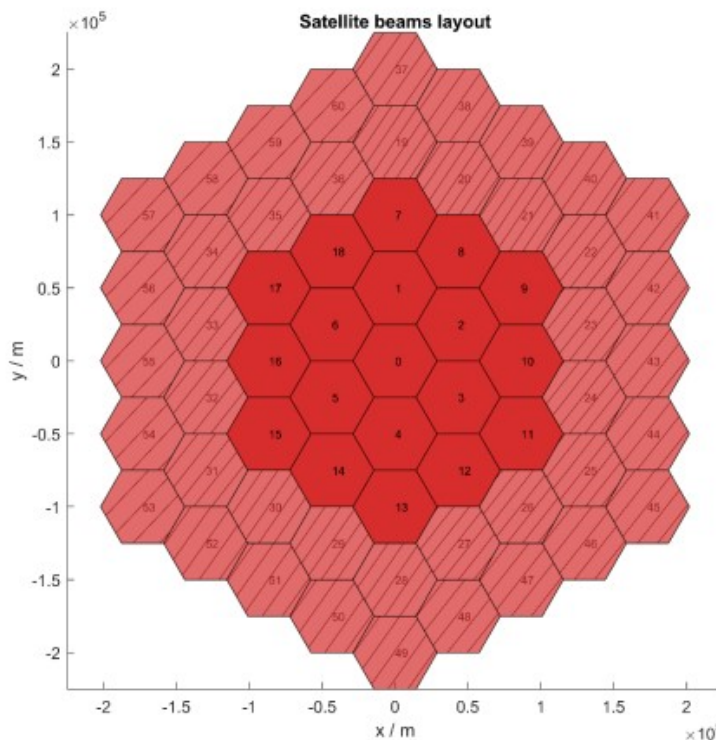


Рис. 3.5. Супутникова діаграма спрямованості супутникових променів

У цьому симуляторі коефіцієнт повторного використання частоти дорівнює 1, що означає, що смуга частот системи використовується у всіх слідах променя. Діаграма променя переміщається разом із рухом супутника.

У цій роботі модель супутникової антени є рефлекторною антеною S-діапазону з круглою апертурою, яка має нормоване посилення антени наступним чином [19]:

$$\text{for } \theta = 0 \quad (3.1)$$

$$4 \left| \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right|^2 \text{ for } < |\theta| < 90^\circ \quad (3.2)$$

де $J_1(ka \sin \theta)$ - функція Бесселя першого порядку та першого роду

аргументу $ka \sin \theta$. k – хвильове число, a – радіус апертури антени, а θ – кут, розрахований з прицілу головного променя антени.

Супутникова антена, що використовується, має максимальне посилення передавальної антени 30 дБі, дорівнює 10 довжинам хвиль, ширина променя по 3 дБ становить 4,4127. Його нормалізована діаграма посилення показано рисунку 3.6.

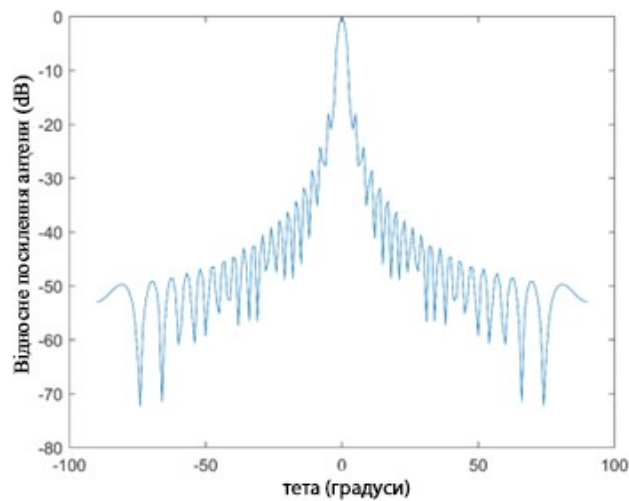


Рис. 3.6. Відносне посилення антени для радіусу апертури = 10 довжин хвиль

Варіант використання UE – це портативний корпус S-діапазону з всеспрямованою антеною, яка має лінійну поляризацію. Коефіцієнти посилення передавальної та приймальної антен дорівнюють 0 дБі.

У мережах NTN виникають високі доплерівські зрушення через рух супутника і рух UE, які призводять до зміщення частоти в сигналі. Зсув частоти (FO) розраховується так [22]:

$$FO = (AUE + DSSat + DSUE) \times 10 - 6 \times fc \quad (3.3)$$

де AUE - точність кристала UE, $DSSat$ - доплерівський зсув через рух

супутника, $DSUE$ - доплерівський зсув через рух UE, а fc - несуча частота. У цьому моделюванні AUE дорівнює 10ppm , $DSSat$ - це максимальний доплерівський зсув для супутника LEO на вказаній висоті, як показано в таблиці 3.1, $fc = 2$ ГГц (S-діапазон) і DS:

$$DSue = fc \times V \times \cos \frac{\theta}{c} \quad (3.4)$$

де V - швидкість UE, θ - кут між вектором швидкості UE та напрямом поширення сигналу між UE та супутником, c - швидкість світла.

У таблиці 3.1 показано максимальну затримку поширення між супутником LEO на різних висотах і UE при куті місця 10° . Затримки поширення в NTN набагато більше, ніж у TN. Він залежить від висоти супутника. Для супутників LEO затримка поширення становить декілька мілісекунд [22].

Таблиця 3.1

Максимальна затримка та доплерівське зрушення для супутника LEO

Параметри \ Висота	LEO на 600 км	LEO на 1200км
Затримка	6.44 мс	10.44 мс
Допплерівський зсув	± 48 кГц	± 42 кГц

3.2 Сценарій розгортання NTN мережі на основі геостаціонарних супутників

Геостаціонарна платформа рухається орбітою на висоті 35786 км в екваторіальній площині та на фіксованій відстані по відношенню до Землі. Тим не менш, через деяку недосконалість земного потенціалу, супутник має деякий рух навколо своєї орбітальної позиції.

Слід прийняти до уваги наступні характеристики, які притаманні для

геостаціонарних супутників:

- затримка одностороннього розповсюдження - це сума затримки розповсюдження фідерної лінії та затримки розповсюдження користувача лінії, таким чином, затримка розповсюдження між шлюзом і UE через супутник;

- час прийому-передачі – це затримка на шляху, шлюз – супутник – UE супутник - шлюз. Це відповідає подвоєній затримці одностороннього розповсюдження;

- регенеративне корисне навантаження (декодування та кодування на борту);

- затримка одностороннього поширення – це затримка поширення між супутником та UE;

- Round Trip Time – затримка на шляху: супутник-UE-супутник.

Для розрахунку затримки розповсюдження мінімальний кут піднесення встановлюється рівним 5° для шлюзу, і встановлений рівним 10° , оскільки термінал може бути встановлений за різних кутів піднесення, але ми вважаємо, що в найгіршому випадку кут піднесення становить 10° .

У наступній таблиці наведено різні ситуації, різні відстані в кілометрах та різні затримки поширення в мілісекундах.

Таблиця 3.2

Затримка поширення сигналу для супутника GEO

Кут піднесення	Лінія	Висота, км	Час, мс
UE: 10°	Супутник - UE	40586	135.286
GW: 5°	Супутник – шлюз	41125.6	137.088
90°	Супутник - UE	35786	119.286
Супутник Bent Pipe			
Затримка в один бік	Шлюз - супутник - UE	81712.6	272.375
Round trip Time	В обох напрямках	163425.3	544.751

Продовження таблиці 3.2

Затримка поширення сигналу для супутника GEO

Кут піднесення	Лінія	Висота, км	Час, мс
Регенеративний супутник			
Затримка в один бік	Супутник - UE	40586	135.286
Round trip Time	Супутник – UE - супутник	81172	270.572

Геостаціонарний супутник фіксований, і тому доплерівський зсув не індексується, за винятком того, що відбувається через можливий рух UE.

Насправді супутник рухається навколо своєї номінальної орбітальної позиції через силу тяжіння (наприклад, Сонця, Місяця) та несферичний компонент земного тяжіння, що впливає на гравітаційну силу Землі.

Супутник повинен зберігатись у коробці, описаній нижче на рисунку 3.7. Супутник зазвичай міститься всередині ящика, який має такі розміри, за допомогою тяги або плазмової тяги двигунів, розташованих на супутнику.

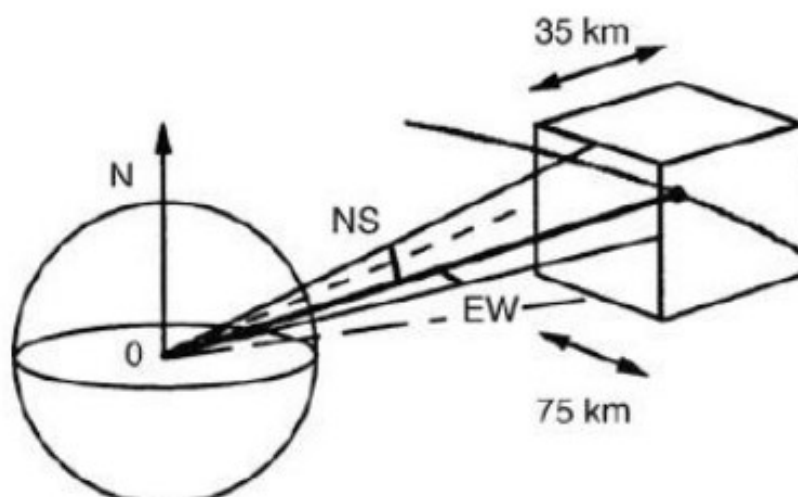


Рис. 3.7. Поле траєкторії для геостаціонарного супутника

На рисунку вище траєкторія супутника представлена, якщо дивитися з точки на екваторі, що має ту саму довготу, що й номінальна орбітальна позиція геостаціонарного супутника.

Геостаціонарний супутник проходить всю траєкторію за 24 години.

Середня тангенціальна швидкість геостаціонарного супутника щодо земної точки становить близько 2,74 м/с.

Супутник підтримується у типовому вікні траєкторії, що характеризується:

- $\pm 37,5$ км як за широтою, так і за довготою, що відповідає куту $\pm 0,05^\circ$;
- $\pm 17,5$ км в екваторіальній площині.

3.3 Сценарій розгортання NTN мережі за допомогою HAPS

Наземні мережі підтримують мобільність UE через різні базові станції. Коли користувач переміщається із зони покриття однієї базові станції до іншої, зв'язок буде переданий від першої базові станції до наступної без помітного порушення сеансу виклику або передачі даних UE, що виконується процедурою передачі обслуговування. Правильно спроектований алгоритм передачі обслуговування є важливим для зменшення накладних витрат на процес передачі обслуговування за збереження бажаного QoS UE та зниження ймовірності блокування нових викликів або сеансів. По суті, процес передачі обслуговування складається з трьох основних фаз: збір інформації про передачу обслуговування, рішення про передачу обслуговування та виконання передачі обслуговування. Однак алгоритми наземної передачі обслуговування розроблені для управління мобільністю UE, припускаючи, що базові станції є стаціонарними.

Стратосфера є відносно стабільною, але на неї може вплинути короткочасний повітряний потік. Отже, HAPS має підтримувати квазістаціонарне становище. Однак деяким системам HAPS необхідно рухатися за певною схемою та у певній області. Згідно з рекомендаціями ITU, положення HAPS має підтримуватись у циліндрі радіусом 400 м та висотою приблизно 700 м [28].

Виходячи з цього, рухи HAPS можна розділити на чотири категорії: горизонтальні, вертикальні, обертальні та поворотні.

Порушення положення HAPS викликають зміни розміру та положення зони покриття стільників на Землі (тобто зони покриття HAPS). Це може призвести до нестабільності каналів зв'язку користувачів, що збільшує можливість і частоту передач обслуговування. На жаль, алгоритми управління передачею обслуговування наземних мереж неповноцінні. Основна причина полягає в тому, що в системах HAPS переміщуються не тільки UE, але також змінюється зона покриття та положення HAPS. Крім того, порушення HAPS є нерегулярним, що означає, що важко встановити чіткий зв'язок між інформацією про швидкість і місцезнаходження UE і зоною покриття стільники. У системах HAPS передача обслуговування може здійснюватися між HAPS (тобто передача обслуговування між осередками). У системах зв'язку HAPS існує два типи передачі обслуговування між стільниками: перший - це передача обслуговування, ініційована мобільністю користувача, що виникає внаслідок переміщення користувача до сусідньої стільники та інший запускається лише нестабільністю платформи [29].

При передачі обслуговування всередині HAPS, коли передача обслуговування відбувається між стільниками, що обслуговуються одним і тим же HAPS, можна використовувати централізовану архітектуру та керування. Важливе питання - контролювати, на який осередок коли переключитися. Алгоритм передачі обслуговування був заснований на структурі кадру множинного доступу з тимчасовим поділом і множинним доступом з тимчасовим поділом, яка аналогічна структурі, доступної в IEEE 802.16. Було запропоновано одночастотний варіант, у якому HAPS передає та приймає різні сфокусовані промені (тобто стільники) у різних частинах кадру. Також було запропоновано багаточастотний варіант як спосіб збільшення пропускну здатності системи. У цьому випадку кожна сота передає та приймає, використовуючи послідовність частот у різних частинах кадру, причому кожна сота в кластері починається в іншій точці послідовності, щоб створити гібридний план повторного

використання часу та частоти.

Функціональна нейронна мережа на радіальній основі використовувалася для прийняття інтелектуальних рішень про передачу обслуговування з урахуванням параметрів індикатора потужності прийнятого сигналу (RSSI), напрями мобільності користувача, положення HAPS, інтенсивності трафіку, керованої антени, кута місця систем HAPS. і затримка як входи нейронних мереж. Беручи до уваги кривизну Землі, вплив обертального руху на ймовірність передачі обслуговування користувача моделі покриття рівної ширини променя. Було зазначено, що осередок зовнішнього шару більш сприйнятливий до обертального руху.

Після створення геометричної моделі покриття антенного променя для систем HAPS, автор використав метод Монте-Карло для розрахунку площі перекриття та аналізу ймовірності передачі обслуговування під час коливального руху моделі рівної зони покриття. Було виведено середню і максимальну ймовірність передачі обслуговування стільникового зв'язку різних рівнів. Результати моделювання показали, що на характеристики передачі обслуговування осередків сильно вплинув стан гойдання, особливо для осередків зовнішнього рівня, але що ефект може бути зменшений шляхом збільшення радіуса покриття осередку до певної міри [29].

Традиційні алгоритми передачі обслуговування, які залежать від фіксованих порогових значень зазвичай ефективно вирішують проблему передачі обслуговування, викликану мобільністю UE. Однак, враховуючи квазістаціонарний стан систем HAPS, ці алгоритми показують погане керування передачею обслуговування. Квазістаціонарний стан HAPS змушує користувачів на межі стільника приймати сигнал змінної потужності, що призводить до частих передач обслуговування між стільниками або ефекту пінг-понгу 9. Крім того, представлення незбалансованого навантаження стільника стає неточним. Вплив квазістаціонарного стану на внутрішній та зовнішній шари по-різному. Використання алгоритму передачі з фіксованим порогом неспроможна забезпечити ефективну передачу обслуговування у всій системі зв'язку. Коли

поріг дуже низький, можливі часті передачі обслуговування; Навпаки, якщо поріг надто високий, передача обслуговування буде ініційована надто пізно, що призведе до тривалих періодів порушення зв'язку.

Враховуючи потужність прийнятого сигналу, швидкість мобільного терміналу та фактори обурення платформи, було запропоновано алгоритм адаптивної передачі обслуговування, який передбачив потужність прийнятого сигналу. Алгоритм передбачив значення потужності прийнятого сигналу, використовуючи модель аналізу часових рядів та динамічно регулюючи час ініціації передачі обслуговування відповідно до передбачення [30].

Однак у цих дослідженнях для аналізу ймовірності передачі обслуговування використовувалася проста модель покриття, така як кругове або регулярне покриття стільника. Хоча ці моделі спрощують аналіз ймовірності передачі обслуговування, їх важко реалізувати на практиці, що призводить до меншої кількості програм. Модель покриття рівної ширини променя була запропонована на основі характеристик ослаблення спрямованого посилення антени. Однак, оскільки системи HAPS розташовані на великих висотах, слід враховувати різницю у втратах на трасі в кожному місці зони покриття.

Для вирішення проблеми високої ймовірності збою та тривалого переривання обслуговування під час процесу передачі обслуговування між системами HAPS було запропоновано адаптивну схему передачі обслуговування, яка використовує кооперативну передачу [31]. У цій схемі HAPS з більш високим коефіцієнтом посилення каналу були обрані для спільної передачі для підвищення надійності системи, а передача обслуговування визначалася напрямом руху терміналу, а коефіцієнт посилення каналу зменшував перерви в обслуговуванні, викликані часті передачі.

Під впливом стратосферного вітру HAPS неминуче переміщатиметься у певному діапазоні. Як вертикальні, і коливальні рухи систем HAPS, і навіть вплив цих рухів на втрати на траєкторії. Крім того, результати моделювання показали, що коливальний рух HAPS має більший вплив на можливість передачі обслуговування, ніж вертикальний рух. Це з тим, що поворотний рух HAPS

викликає дрейф положення осередків і зміна форми. Використання ефективної та безшовної інтеграції між різнорідними аерокосмічними сегментами (наприклад, LEO та HAPS) для глобального розширення широкосмугових бездротових з'єднань виглядає багатообіцяючим для покращення характеристик передачі обслуговування. У таких сценаріях супутники LEO можуть забезпечувати зворотний зв'язок HAPS. Виходячи з цього припущення, можна запропонувати стратегію динамічної передачі обслуговування для оптимізації моменту передачі обслуговування та розподілу ресурсів. Враховуючи пріоритет користувача, вимоги до мінімальної швидкості, вимоги до затримки, посилення каналу та трафіку променів.

Схема передачі обслуговування всередині HAPS з урахуванням трафіку, в якій користувачі в областях, що перекриваються, перевантажених осередків будуть змушені виконувати передачу обслуговування раніше, ніж їх оптимальні межі передачі обслуговування, щоб частково збалансувати трафік між сусідніми осередками. Схема спільної спрямованої передачі обслуговування між стільниками для систем HAPS була вивчена як цільова стільника передачі обслуговування та дві сусідні з нею стільники працювали спільно, щоб використовувати коливання трафіку для покращення характеристик передачі обслуговування [32].

По суті, користувачі в зоні перекриття перевантаженої цільового стільника передачі обслуговування були змушені виконувати спрямовану передачу обслуговування до їх оптимальної межі передачі обслуговування, щоб звільнити ресурси для викликів передачі обслуговування, які інакше були б відкинуті через брак ресурсів та тайм-аут черги.

Процес передачі обслуговування між HAPS, коли HAPS працює з фіксованими або керованими спрямованими антенами у разі заміни HAPS або для обслуговування або для періодичної заміни систем HAPS з коротким терміном служби. Ефективність передачі обслуговування оцінювалася для обох типів антен на основі низки критеріїв, таких як ширина променя антени, висота платформи та циліндр положення HAPS. Результати показали, що для користувачів, що

використовують фіксовані антени, спрямовані до центру циліндра позиційного, передача обслуговування може початися, як тільки нова платформа входить в циліндр. Користувачі з центру зони обслуговування повинні використовувати антену із найширшою шириною променя (29°), тоді як користувачі на краю зони обслуговування можуть використовувати більш вузьку ширину променя. Користувачі, які використовують керовані антени, можуть використовувати більш вузьку ширину променя. Однак було показано, що з'єднання будуть відключені для будь-якої ширини променя менше 5° , якщо користувачі не використовують дві антени або якщо нова платформа не слідуватиме по близькій траєкторії польоту до обслуговуючої платформи (вертикальний поділ ± 305 м).

Використання значень RSSI як критерій прийняття рішення призведе до перевантаження HAPS з великим RSSI, що викличе перевантаження даних у цих вузлах. Навпаки, системи HAPS з невеликими значеннями RSSI можуть залишатися в режимі очікування, що може призвести до недостатнього використання мережевих ресурсів. Тим часом, через обмежену енергію висотних платформ енергія систем HAPS з великим RSSI швидко закінчується, а енергія HAPS з невеликими значеннями RSSI залишається надмірною, що призводить до дисбалансу енергоспоживання між системами HAPS. Для вирішення цієї проблеми існує алгоритм передачі обслуговування з балансуванням навантаження, заснований на значеннях RSSI та обліку енергії у мережах HAPS. Таблиця 3.3 показує порівняння між доступними схемами передачі обслуговування з точки зору їх запропонованих рішень (між або всередині HAPS), параметрів, що враховуються при прийнятті рішень про передачу обслуговування, та типу переміщення, що викликає передачу обслуговування.

Загалом, необхідно зазначити, що ефективне управління передачею обслуговування надзвичайно важливе для підтримки ролі HAPS-SMBS у раніше згаданих сценаріях використання надання послуг IoT, охоплення незапланованих користувальницьких подій та підтримки інтелектуальних транспортних систем. Для виконання вимог варіантів використання HAPS слід розглянути три основні моменти, пов'язані з передачею обслуговування.

Таблиця 3.3

Порівняння методів управління передачею обслуговування в мережах HAPS

Пропоноване рішення	Inter-/Intra-HAPS	Розглянуті параметри	Тип руху
Передача обслуговування рівня MAC із малою затримкою	Intra-HAPS	RSSI, CIR, завантаження трафіку та позиція користувача	Крок руху
Радіальну нейронна мережа для прийняття інтелектуальних рішень про передачу обслуговування	Intra-HAPS	RSSI, напрям мобільності користувача, положення HAPS, інтенсивність трафіку, антена, кут місця систем HAPS і затримка	Вертикальний та горизонтальний рух
Алгоритм адаптивної передачі обслуговування, який прогнозує потужність прийнятого сигналу	Intra-HAPS	RSSI, швидкість мобільного терміналу та фактори обурення платформи	Коливальний рух
Алгоритм прийняття рішення про передачу обслуговування на основі прогнозування з адаптивним порогом для динамічного регулювання часу ініціювання передачі обслуговування	Intra-HAPS	Значення RSSI встановлено	Горизонтальний рух
Адаптивну схему передачі обслуговування, в якій використовується спільна передача для підвищення надійності системи	Inter-HAPS	Напрямок руху терміналу та посилення каналу	Рух мобільного терміналу
Стратегія динамічної передачі обслуговування для оптимізації моменту передачі обслуговування та розподілу ресурсів	HAPS із супутниками LEO	Пріоритет користувача, вимога мінімальної швидкості, вимога затримки, посилення каналу та трафік променів	Рух мобільного терміналу

Порівняння методів управління передачею обслуговування в мережах HAPS

Пропоноване рішення	Inter-/Intra-HAPS	Розглянуті параметри	Тип руху
Вивчено вплив типу антен та ширини променя на перемикання при заміні HAPS	Inter-HAPS	Ширина променя антени, висота платформи та напрямок антени користувача	Заміна руху
Адаптивна модуляція та кодування фізично, щоб гарантувати, що поточні виклики не будуть перервані рухом платформи.	Intra-HAPS	Географічна інформація, області переходу ставок і області, що перекриваються	Заміна руху
Сусідні стільники спільно змушують користувачів в області перекриття перевантаженої цільової стільники передачі обслуговування виконати передачу обслуговування до їхньої оптимальної межі передачі обслуговування, щоб звільнити ресурси для викликів передачі обслуговування	Intra-HAPS	Положення користувачів, напрямок руху HAPS та вантажопідйомність HAPS	Обертальний рух
Алгоритм передачі обслуговування з балансуванням навантаження, заснований на RSSI та поінформованості про енергоспоживання в мережах HAPS	Inter-HAPS	RSSI, залишкова енергія HAPS та напрямок руху мобільного терміналу	Рух мобільного терміналу
Примусове перемикання UE в областях, що перекриваються, для вирівнювання навантаження між сотами.	Intra-HAPS	Навантаження трафіку HAPS та положення UE	Горизонтальне зміщення та обертання

По-перше, моделі мобільності випадкові у сценаріях використання Інтернету речей та незапланованих подій, тоді як у сценаріях використання інтелектуального транспорту моделі мобільності більш передбачувані. По-друге, слід враховувати швидкість мобільності, щоб виконати швидку передачу обслуговування чи нормальну передачу обслуговування. Очевидно, що інтелектуальний транспорт та підтримка повітряної мережі вимагають швидкої передачі обслуговування, оскільки користувачі, як правило, пересуваються з високою швидкістю, наприклад автомобілі, поїзди та літальні апарати, на той час як пристрої (датчики) або користувачі Інтернету речей за незапланованих подій може допускатися звичайна затримка передачі обслуговування. Таким чином, майбутні рішення з управління передачею обслуговування повинні враховувати чутливі до часу застосування для мережних об'єктів, що швидко рухаються. Потретє, в алгоритмах передачі обслуговування слід враховувати вимоги додатків для кожного варіанту використання, оскільки деякі програми чутливі до часу і вимагають алгоритмів швидкої передачі обслуговування з низькими показниками втрати пакетів. Зверніть увагу, що відповідно до специфікацій 5G протоколи передачі обслуговування покладаються на синхронізацію висхідної лінії зв'язку, для якої може знадобитися процедура довільного доступу. Однак 3 або 4-стороннє квантування для початкового доступу може призвести до неприйнятних затримок поширення, особливо у варіантах використання HAPS-SMBS для підтримки та управління повітряною мережею та HAPS-SMBS для підтримки інтелектуальних транспортних систем. Поки не зовсім ясно, чи вдасться за допомогою традиційних рішень дотримуватись вимог до затримки 5G і вище.

Для експлуатації HAPS потрібно від двох до чотирьох членів наземної бригади для спостереження за різними аспектами планування місії, управління польотом, роботи датчиків та оцінки даних, як показано на рисунку 3.8. Операційна складність та вартість, ймовірно, збільшуватимуться у сценаріях, де розгорнуто кілька систем HAPS, і їм необхідно координувати свою роботу та працювати разом як рій. Щоб подолати технічні та економічні проблеми, пов'язані з розгортанням мережі систем HAPS, для управління та координації систем HAPS

знадобиться певний рівень автономії.

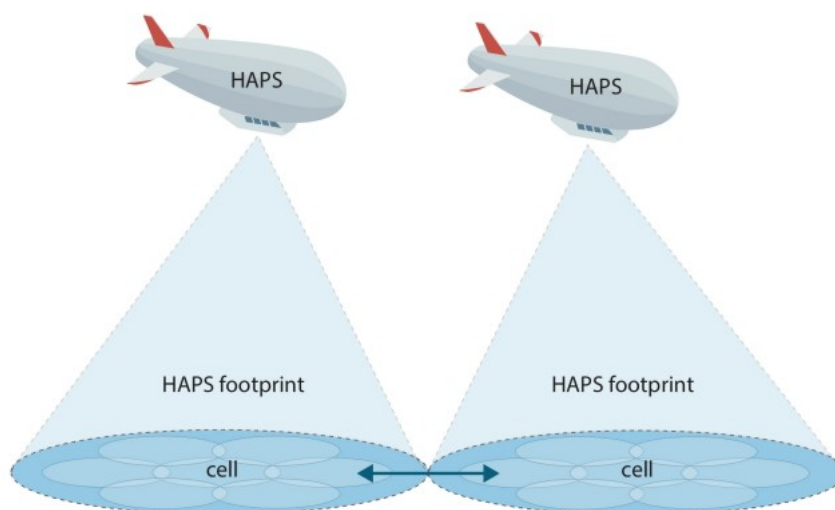


Рис. 3.8. Передача обслуговування між HAPS

Автономність усуне необхідність прямого втручання людини на багатьох операційних рівнях та дозволить системам HAPS приймати розумні рішення на основі співпраці. Фактично, HAPS можуть відігравати важливу роль в управлінні повітряною мережею та секціонуванні мережі. Це пов'язано з вищим положенням HAPS, яке дозволяє йому збирати дані та інформацію про стан мережі з більшої частини повітряної мережі. Інша перевага полягає в тому, що HAPS може бути оснащений обчислювальними пристроями, що дозволяє виконувати повні або часткові обчислення повітря, не перевантажуючи канали зв'язку з наземними центрами обробки даних. Однак цей підхід потребує тісної та надійної співпраці між системами HAPS для повного використання їх розподілених обчислювальних ресурсів. Ми також повинні згадати, що оскільки конфіденційність є однією з основних проблем при збиранні та аналізі даних, федеративне навчання може пропонувати навчання без переміщення даних з пристроїв на централізований сервер, тим самим зберігаючи конфіденційність користувачів. Одним із рекомендованих рішень може бути використання федеративного навчання у майбутніх мережах HAPS.

Реалізацію напівавтономного рою висотних платформ з можливостями

самоорганізації для максимального збільшення покриття зони зв'язку. Застосування методів навчання з підкріпленням та Swarm Intelligence (SI) для вирішення проблеми координації кількох HAPS для максимального охоплення зони зв'язку. Було помічено, що алгоритм SI показав швидшу збіжність та стабільніший профіль охоплення користувачів завдяки простій логіці, заснованій на правилах. Однак алгоритм RL досяг вищих загальних пікових показників охоплення користувачів, але з деякими провалами охоплення через індивідуальну стратегію дослідження HAPS. Методи, засновані на RL, продемонстрували внутрішню координаційну стійкість завдяки незалежності від петель зворотного та міжагентського зв'язку.

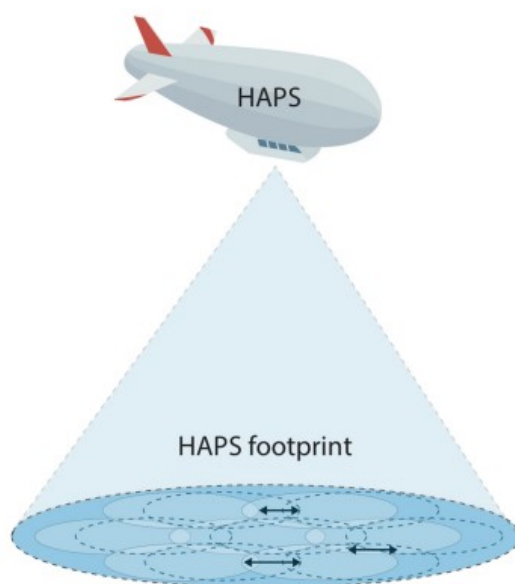


Рис. 3.9. Передача обслуговування всередині HAPS

Отже, під час координації систем HAPS підходи на основі розвідки рою можуть бути більш ефективними та надійними, але з менш оптимальними результатами охоплення. Навпаки, алгоритми RL можуть сягати кращих піків покриття, але з ризиком випадкових провалів. Цей висновок слід враховувати при розробці п'ятого варіанта використання HAPS-SMBS для заповнення пробілів у покритті. Оскільки дуже складно передбачити та виявити прогалини в покритті з використанням звичайних математичних моделей, рішення на основі RL мають

високі значення, оскільки вони певною мірою оминають необхідність у обробці математичних моделей, що піддаються обробці. Тим не менш, слід зазначити, що підходи RL зазвичай чутливі до розробки належної функції винагороди, інакше немає гарантії, що алгоритм може зійтися до відповідного рішення.

Через екстремальний характер навколишнього середовища платформа HAPS може вийти з ладу і вимагати заміни. координацію між групою з чотирьох автономних систем HAPS у сценарії аварійної ситуації з хмарою вулканічного попелу для покриття повітряного зв'язку, коли наземна чи супутникова інфраструктура була деградована чи відсутня. Рій HAPS був автономно координований і використовував свої можливості самоорганізації для реагування на відмову одного або кількох HAPS та для автономної адаптації до додавання запасного HAPS. Автономія в цьому відношенні відноситься до здатності HAPS приймати локальні рішення з обмеженими або відсутніми глобальними знаннями і при цьому спільно досягати загальної мережі. У рої HAPS самоорганізація та координація мають вирішальне значення для забезпечення покриття зв'язку в надзвичайних умовах вулканічної хмари, алгоритм розвідки рою для цього сценарію [31]. HAPS, що брали участь у рої, обмінювалися важливими даними під час дослідження навколишнього середовища. Розроблений алгоритм складався з чотирьох фаз: режим розвідки, режим експлуатації, цикл прийняття рішень та режим дослідження. Результати моделювання показали, що за рахунок самоорганізації та координації рою протягом однієї години запасні HAPS забезпечили необхідне зростання продуктивності глобального покриття.

У літературі також представлені багатообіцяючі рішення у сфері програмного контролю та управління мережею. Наприклад, SDN відокремлює площини даних та управління один від одного, щоб знизити складність управління мережею. NFV відокремив мережеві функції від фізичних пристроїв, що продемонструвало потенціал полегшення розгортання нових послуг з підвищеною гнучкістю та швидшою окупністю. Також поділ мережі дозволило підключати пристрої з різними вимогами через кілька логічних мереж, побудованих на основі загальної фізичної інфраструктури.

Щоб забезпечити доступність мережі як послуги відповідно до вимог користувачів, під час поділу мережі використовувалися NFV, SDN, хмарні обчислення та периферійні обчислення. Увімкнення поділу мережі потребує успішної взаємодії між цими технологіями, що є складним завданням. Очікується, що програмна обробка у поєднанні з інтелектуальними алгоритмами зробить контроль та керування мережею автоматизованими та самоорганізованими. Наприклад, програмно-визначені компоненти повітряних мереж можуть бути автоматично та динамічно перепрограмовані на основі інтелектуальних рішень для адаптації до змін у середовищі зв'язку. Для вирішення проблем, пов'язаних з динамічним мережевим трафіком, безліччю постачальників послуг та мобільністю, необхідно враховувати динамічний поділ мережі [32]. Щоб увімкнути динамічний поділ мережі, необхідно точно оцінити потреби користувачів та відповідним чином динамічно розподіляти ресурси. Для прогнозування трафіку користувача можна використовувати кілька схем теорії навчання, таких як глибоке навчання і навчання з підкріпленням. Після точного прогнозування можна використовувати ефективні схеми розподілу ресурсів для активації динамічного поділу мережі.

Системи HAPS використовувалися як площині управління програмно-визначеної повітряної мережі. Контролери були розгорнуті в системах HAPS, щоб скористатися перевагою їх широкого охоплення та відносної стабільності, як було показано, потенційно скорочує час оновлення конфігурації в площині даних повітряної мережі, викликане зміною довжини та зв'язності каналів між компонентами повітряної мережі через їх високу мобільності. Це дослідження може бути дуже корисним для реалізації та розробки шостого варіанта використання «HAPS-SMBS для підтримки та управління повітряною мережею». Програмно-визначувана архітектура бортової магістральної мережі (SD-ABN) було запропоновано підтримувати покриття та забезпечувати зв'язок з військовими частинами, а також забезпечувати гнучкість, відкритість, функціональну сумісність та можливість розвитку мережі. Для вирішення завдань управління трафіком у SD-ABN була застосована сегментна маршрутизація. Крім

того, алгоритм планування мережного трафіку був розроблений на основі SD-ABN для підвищення надійності передачі та використання смуги пропускання за рахунок балансування мережного трафіку між кількома надійними шляхами передачі.

У майбутніх мережах NAPS функції управління мережею будуть розподілені і автоматизовані, щоб якнайкраще задовольняти багатовимірні (вартість, затримка, доступність, пропускна спроможність, широкі можливості підключення і т. д.) Сервісні вимоги. Цей процес буде самоорганізується і самооптимізується, незалежно від адміністративних кордонів, або в рамках одного оператора, або між операторами з автономною зміною розташування розділів мережі. Коли задіяно кілька провайдерів/операторів, керування всією мережею за допомогою одного модуля керування (оркестратора) збільшує складність та затримку. Таке збільшення затримки буде більш помітним для масового зв'язку машинного типу в 5G та масивного наднадійного зв'язку з малою затримкою у майбутніх бездротових системах 6G. Щоб подолати ці проблеми, можна використовувати кілька розподілених оркестраторів для зменшення складності.

У такій схемі кожен оркестратор призначений управління певними сегментами мережі. Ці множинні оркестратори потім управляються іншим об'єктом, званим гіперстратором, робота якого полягає в управлінні загальним розподілом мережевих ресурсів [34]. Хоча ця модель управління спочатку не була запропонована для систем NAPS, її варто вивчити глибше. Цей високий рівень контролю та оркестрації є необхідною вимогою для реалізації багатьох передбачуваних варіантів використання NAPS-SMBS, таких як створення повітряного центру обробки даних, заповнення пробілів у покритті, а також підтримка та керування повітряними мережами. Оскільки системи NAPS можуть утворювати кластер MEC або повітряний центр обробки даних для обробки вивантажених даних із повітряних або супутникових мереж (див. Четвертий варіант використання, Розділ II-B), потрібні інтелектуальні схеми планування завдань, які враховують споживання енергії NAPS, , обчислювальні можливості та

обчислювальні навантаження. Потрібні інтелектуальні алгоритми прийняття рішень, щоб вирішити, коли ефективно обробляти дані в кластерах HAPS MEC, ніж відправляти необроблені дані в наземні центри обробки даних.

Наднадійні програми з малою затримкою, які виникли в результаті злиття 5G, SDN/NFV та AI/ML (наприклад, автономне водіння, системи екстреного реагування, віддалена медицина тощо), вимагають розподілу функцій управління та обробки у напрямку до точки збору та споживання даних. У цьому відношенні системи HAPS можуть надавати послуги на межі величезної мережі над повітряними мережами та під супутниковими мережами. Очікується, що системи HAPS відіграватимуть роль плаваючого повітряного центру обробки даних, як описано в четвертому сценарії використання, згаданому в розділі II-B. Це пов'язано з їх широким охопленням над низьковисотними компонентами повітряної мережі (наприклад, БПЛА), що робить їх ідеальними для збирання великих обсягів даних про статус повітряної мережі та використання таких даних в управлінні мережею. Однак критично важливою проблемою є управління та планування обчислювальних та комунікаційних ресурсів у системах HAPS для обслуговування швидкого та динамічного середовища безпілотних літальних апаратів та супутників.

Нещодавно у кількох дослідженнях було запропоновано використати декілька БПЛА для формування кластеру Mobile Edge Computing (MEC). З підтримкою кількох БПЛА, в якій наземні вузли IoT могли розвантажити обчислювальні завдання, які не могли бути оброблені за їх обмеженими можливостями. Автор представив алгоритм балансування навантаження для балансування обчислювального навантаження між БПЛА та використав глибоке навчання з підкріпленням для планування обчислювальних завдань. У мережі MEC, що складається з кількох БПЛА, завдання мінімізації сумарної потужності. Мінімізація потужності, спільно з оптимізацією асоціації користувачів, управління потужністю, розподіл обчислювальної потужності та планування розташування БПЛА. Дві архітектури, у яких БПЛА міг працювати або як вузол у розподіленому кластері MEC, або як ретрансляційний вузол, який допомагав у

обчислювальному розвантаженні з пристроїв IoT на віддалений прикордонний наземний обчислювальний вузол. Теоретико-ігрове середовище та навчання з підкріпленням були представлені для обчислювального розвантаження в мережі МЕС, керованої декількома постачальниками послуг.

Мережа утворена серверами МЕС, встановленими на стаціонарних БС та БПЛА, які були квазістаціонарними. Хоча у цих дослідженнях пропонувалося використовувати кілька БПЛА на формування кластера МЕС і обробки розвантажених обчислювальних завдань, самі ідеї можуть бути реалізовані в мережах HAPS. Фактично, мережа систем HAPS може забезпечити стабільніший кластер МЕС з вищими обчислювальними можливостями порівняно з МЕС на базі БПЛА. Це з квазістаціонарним статусом систем HAPS зі своїми здатністю нести досконаліші обчислювальні сервери і більшої тривалістю польоту. МЕС на основі HAPS може обслуговувати не лише наземні UE, але також повітряні UE та супутники. Однак для реалізації концепції створення МЕС на основі HAPS необхідні надійний зв'язок між системами HAPS, інтелектуальне планування задач та передові методи розподілу ресурсів. Запропонована система МЕС з підтримкою кількох БПЛА, в якій наземні вузли IoT могли розвантажити обчислювальні завдання, які не могли бути оброблені за їх обмеженими можливостями. Автор представив алгоритм балансування навантаження для балансування обчислювального навантаження між БПЛА та використав глибоке навчання з підкріпленням для планування обчислювальних завдань. У мережі МЕС, що складається з кількох БПЛА, завдання мінімізації сумарної потужності. Автор мінімізував потужність, спільно оптимізувавши асоціацію користувачів, управління потужністю, розподіл обчислювальної потужності та планування розташування БПЛА. Дві архітектури, у яких БПЛА міг працювати або як вузол у розподіленому кластері МЕС, або як ретрансляційний вузол, який допомагав у обчислювальному розвантаженні з пристроїв IoT на віддалений прикордонний наземний обчислювальний вузол. Теоретико-ігрове середовище та навчання з підкріпленням були представлені для обчислювального розвантаження в мережі МЕС, керованої декількома постачальниками послуг.

Що стосується підтримки варіантів використання управління мережею HAPS має бути автоматизовано, щоб мережа систем HAPS могла бути мережею, що саморозвивається. Оскільки передбачається, що системи HAPS забезпечуватимуть центри обробки даних з повітря (четвертий варіант використання), слід враховувати кілька вимог, включаючи надійну співпрацю між системами HAPS та ефективне управління обчислювальними ресурсами та ресурсами зберігання між розподіленими системами HAPS. Крім того, інтелектуальне планування завдань, яке враховує можливості, споживання енергії та обчислювальне навантаження кожного HAPS. Більш того, дуже важливо мати інтелектуальні алгоритми прийняття рішень для розвантаження даних, щоб вирішити, де обробляти дані (наприклад, у HAPS або наземній мережі), що необхідно для підтримки другого, третього, четвертого, шостого та сьомого варіантів використання. Ще одна важлива вимога для всіх варіантів використання – мережі HAPS повинні підтримувати парадигми SDN та NFV. Фактично системи HAPS є потенційним кандидатом на місце контролерів SDN в архітектурі VHetNet на основі SDN.

3.4 Порівняння продуктивності супутникових GEO і LEO систем наступного покоління та волоконно-оптичних систем

В таблиці 3.4 показано для порівняння показники LEO, GEO і волоконно-оптичних систем для глобального покриття. Зроблено висновок, що, наступне покоління LEO супутникових зможе надавати високоякісні інтернет-послуги в регіонах, не охоплених оптоволоконним з'єднанням. Однак, супутникові мережі не повинні конкурувати з наземними мережами, вони повинні взаємодіяти, щоб надати доступ в Інтернет в глобальному масштабі і максимальною пропускнуою здатністю.

Таблиця 3.4

Порівняння продуктивності супутникових GEO і LEO систем наступного покоління

	Оптоволокно	LTE	Стільниковий зв'язок в ММД	Традиційний GEO/МEO супутниковий зв'язок	LEO HTS супутниковий зв'язок (StarLink)	FSO
Ємність	Необмежено	До 3 Гбіт/с	Теоретично до 100 Гбіт/с	50-100 Мбіт/с (GEO) 100-80 Мбіт/с (MEO)	1-5 Гбіт/с	До 30 Гбіт/с
Затримка передачі даних	Наднизька затримка	До 3 мс	До 0,01 мс	Висока затримка 400 мс (GEO) 135 мс (MEO)	Близько 60 мс	0,005 мс
Вимоги	Доступ до місцевих інфраструктур (над або під землею)	Обмежений спектр(смуги пропускання частот від 1,4 МГц до 20 МГц)	Спектр 1-100 ГГц	Ліцензія на земні станції	Ліцензія на земні станції	Довжина хвилі 1550 нм
Чинники вартості	Змінна вартість за кілометр Тривалий час розгортання	Теоретична межа в 1 Гбіт/сек - від 3,2 км (2600 МГц) до 19,7 км (450 МГц). Фіксована вартість за канал + повторювач	Обмеження розмірів стільників (100- 150 м). Межі зовнішнього та внутрішнього (в будівлі) використання	Фіксована вартість – швидке розгортання Висока змінна вартість за Мбіт/с Незалежність від відстані	Фіксована вартість – дуже швидке розгортання Низька змінна вартість за Мбіт/с Незалежність	Висока захищеність каналу Швидке розгортання
Місцевість	Збільшує вартість прокладання за межами міської забудови	Впливає на кількість необхідних повторювачів . Збільшує вартість обслуговування	Поширюється в межах прямої видимості	Не впливає	Не впливає	Не впливає
Реконфігурованість	Обмежена	Обмежена	Обмежена	Обмежена	Швидка реконфігурованість	Швидка реконфігурованість, в т.ч. у випадку стихійного лиха
Довжина лінії зв'язку, км	Міжконтинентальний зв'язок	До 100 км	Для міського сценарію від декількох метрів до 150 м	8046	Теоретично не обмежена	До 15 км для наземних ліній

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі досліджено сучасний стан роботи NTN в рамках 3GPP, детально пояснені аспекти проектування. Показано, що реалізація технологій 5G для наземних мереж є реальністю. Але необхідні не лише стандартизація, а й подальші дослідження аспектів проектування NTN.

Зроблено наступні висновки:

1) Інтеграція мереж, що працюють за різними технологіями, та мають різні переваги, призначення, конфігурації можуть забезпечити величезну смугу пропускання для користувачів широкосмугового Інтернету.

2) тенденцію до інтеграції космосу та архітектури наземних мереж за допомогою архітектури терабітно-оптичної мережі - "Fibre in the Sky" (укр.волокно в небі).

3) нові концепції мережі з акцентом на інтеграцію із наземним NTN мережами та космічними сегментами в оптичному діапазоні можуть надати надзвичайно гнучку та швидкісну телекомунікаційну систему.

Впровадження наземним NTN технологій є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності та мобільності мереж доступу, а також може знизити вартість мереж доступу. Тому прогнозується, що розвиток мереж мобільного зв'язку 5G та майбутньої технології 6G будуть засновані на цій технології.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. T. Tozer and D. Grace, “High-altitude platforms for wireless communications,” *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 13, no. 3, Jun. 2001.
2. J. Qiu, D. Grace, G. Ding, M. D. Zakaria, and Q. Wu, “Air-ground heterogeneous networks for 5G and beyond via integrating high and low altitude platforms,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 6, pp. 140–148, Dec. 2019
3. K. Hoshino, S. Sudo, and Y. Ohta, “A study on antenna beamforming method considering movement of solar plane in HAPS system,” in *IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, 2019.
4. M. Handley, “Using ground relays for low-latency wide-area routing in mega constellations,” in *ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets)*, 2019.
5. A. Aragon-Zavala, J. L. Cuevas-Ruíz, and J. A. Delgado-Penín, *High-Altitude Platforms for Wireless Communications*. Wiley Online Library, 2008.
6. Типы спутниковых орбит и их определения [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <http://mediasat.info/2015/06/30/satellite-orbit-guide/> (14.11.2021 р.)
7. Как работают спутники? [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <https://hi-news.ru/technology/kak-rabotayut-sputniki.html> (14.11.2021 р.)
8. Всё, что вам нужно знать о Геостационарной спутниковой орбите. Редакция Mediasat [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <http://mediasat.info/2015/07/11/geo-gso/> (11.11.2021 р.)
9. Крухмалев В.В., Гордиенко В.Н. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей - М.: Телеком, 2004. - 510 с.
10. Архитектура и основные принципы работы спутниковых систем связи [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <https://docplayer.ru/75447592-4-arhitektura-i-osnovnye-principy-raboty-sputnikovyh-sistem-svyazi.html> (12.11.2021)
11. Супутникові СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ НА ТРАНСПОРТІ [Электронный ресурс] // – Режим доступа: http://shevchenkove.org.ua/person_syte/Golub/suputniki2016/teoria7.html (14.11.2021)
12. X. Lin et al., “5G New Radio evolution meets satellite communications:

Opportunities, challenges, and solutions,” in 5G and Beyond: Fundamentals and Standards, X. Lin and N. Lee, Eds. Springer, 2021.

13. RP-193235, “Study on NB-IoT/eMTC support for non-terrestrial network”, 3GPP TSG-RAN Meeting #86, December 2019 [Электронный ресурс] // Режим доступа:

<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3747> (29.10.2021)

14. M. Giordani and M. Zorzi, “Non-terrestrial communication in the 6G era: Challenges and opportunities,” arXiv preprint arXiv:1912.10226, December 2019.

15. F. Rinaldi et al., “Non-terrestrial networks in 5G & beyond: A survey,” IEEE Access, vol. 8, pp. 165178-165200, 2020.

16. TR 38.811, “Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks,” V15.4.0, October 2020. [Электронный ресурс] // Режим доступа:

<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3234> (30.10.2021)

17. TR 22.822, “Study on using satellite access in 5G,” V16.0.0, August 2018. [Электронный ресурс] // Режим доступа:

<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3372> (30.10.2021)

18. TR 28.808, “Study on management and orchestration aspects of integrated satellite components in a 5G network,” V1.1.0, January 2021. [Электронный ресурс] // Режим доступа:

<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3617> (30.10.2021)

19. 3GPP TR 38.811, “Study on New Radio (NR) to support non terrestrial networks,” Release 15, Sept. 2019.

20. 3GPP, TS 36.440, “General aspects and principles for interfaces supporting Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS) within E-UTRAN,” Rel. 14, 2017.

21. V. Joroughi, M. A. Vazquez, A. I. P`erez-Neira, B. Devillers, “Onboard Beam Generation for Multibeam Satellite Systems,” in IEEE Transactions on Wireless

Communications, 2017

22. 3GPP TR 38.821, “Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)” Release 16, Dec. 2019

23. 3GPP, TR 25.905, “Technical Specification Group Radio Access Network; Improvement of the Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS) in UTRAN” Rel. 7, 2007.

24. Сивик О.С., Яковець В.П. "Послуги радіомовлення по багатопробієвим NTN мережам з підтримкою 5G NR" Міжнародна науково-технічна конференція студентства та молоді. – Київ: 21 жовтня 2021 р. – С. 82 - 83.

25. Сивик О.С., Топчій В.М., Шеховцов В.С., "Аналіз та вдосконалення сценаріїв розгортання NTN мереж", Наукові записки Державного університету телекомунікацій, – 2021, – №1

26. EMEA Satellite Operators Association, “ESOA satellite action plan for 5G standards,” white paper. [Електронний ресурс] // Режим доступу:

<https://esoa.net/wp-content/uploads/2018-06-ESOA-5G-standards.pdf>
(29.10.2021)

27. A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroğlu, “Laser Inter-Satellite Links in a Starlink Constellation,” arXiv:2103.00056, 2021.

28. ITU-R, “Preferred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz.” International Telecommunication Union, Geneva, Recommendation F.1500, Jan. 2000.

29. P. He, N. Cheng, and J. Cui, “Handover performance analysis of cellular communication system from high altitude platform in the swing state,” in IEEE International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), 2016.

30. S. Jin, and H.-l. Hong, “A handover decision algorithm with an adaptive threshold applied in HAPS communication system,” in Theory, Methodology, Tools and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems. Springer, 2016

31. P. He, N. Cheng, S. Ni, and C. Li, “An adaptive handover scheme based on cooperative transmission from high altitude platform stations,” in IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control

Conference (IAEAC), 2017

32. S. Li, L. Wang, G. David, and D. Ma, “Cooperative directional inter-cell handover scheme in high altitude platform communications systems,” *Journal of Electronics (China)*, vol. 28, no. 2, p. 249, Oct. 2011.

33. O. Anicho, P. B. Charlesworth, G. S. Baicher, and A. Nagar, “Autonomously coordinated multi-HAPS communications network: Failure mitigation in volcanic incidence area coverage,” in *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat)*, 2019

34. L. U. Khan, I. Yaqoob, N. H. Tran, Z. Han, and C. S. Hong, “Network slicing: Recent advances, taxonomy, requirements, and open research challenges,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 36 009–36 028, Feb. 2020.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Навчально-науковий інститут
телекомунікацій



АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СЦЕНАРІЇВ РОЗГОРТАННЯ NTN МЕРЕЖ З ВИСОКОЮ ПРОПУСКНОЮ ЗДАТНІСТЮ

ДОПОВІДАЧ:

студент групи РТДМ-61
Сивик Олександр Степанович
Керівник Кременецька Я.А.

Актуальність роботи – обрана тема актуальна в наші дні, так як розгортання NTN мереж зможе вирішити проблем з доступністю мобільного зв'язку та послуг з доступом до мережі Інтернет на територіях які не обслуговуються наземними мережами, а також для збільшення гнучкості та ефективності майбутніх мереж 5G (6G).

Мета – аналіз аспектів проектування, управління топологією, передачею та розподілу ресурсів в низькоорбітальних системах LEO, висотних платформах HAPS, порівняння за пропускною здатністю різних інтегрованих з наземними мережами.

Об'єкт дослідження – сценарії розгортання неназемних телекомунікацій.

Роль неназемних мереж

Сприяти розгортанню послуги 5G в необслуговуваних районах

Підвищити надійність послуги 5G

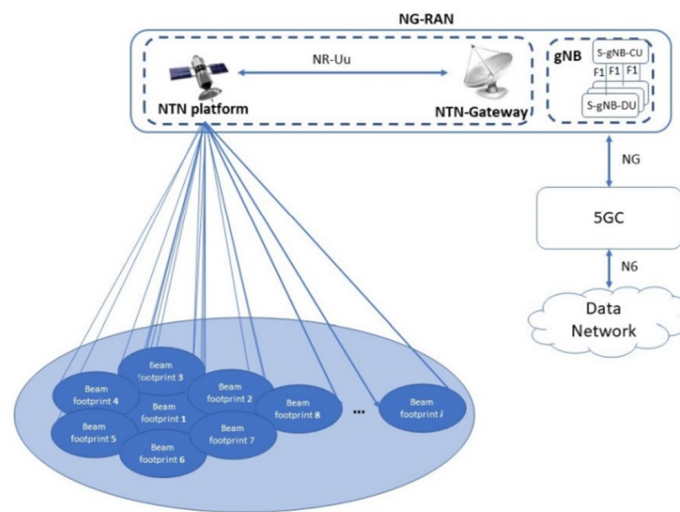
Запровадити масштабованість мережі 5G

Резервне з'єднання

Розвантаження даних

Паралельні незалежні канали

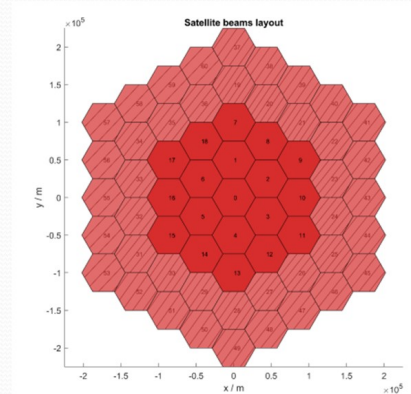
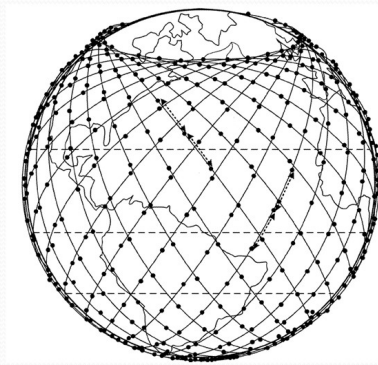
Платформи NTN мережі



Орбіти супутника

Назва орбіти	Абревіатура	Висота орбіти (в кілометрах)
Низька навколоремна орбіта	LEO	200 – 1200
Середня навколоремна орбіта	MEO	1200 – 35790
Геосинхронна орбіта	GSO	35790
Геостационарна орбіта	GEO	35790
Висока навколоремна орбіта	HEO	Вище 35790

Розгортання NTN за допомогою низькоорбітальних угруповань



Допплерівські зрушення

У мережах NTN виникають високі доплерівські зрушення через рух супутника і рух UE, які призводять до зміщення частоти в сигналі. Зсув частоти розраховується наступним чином:

$$FO = (AUE + DSSat + DSUE) \times 10^{-6} \times fc \quad (1)$$

де AUE - точність кристала UE, $DSSat$ - доплерівський зсув через рух супутника, $DSUE$ - доплерівський зсув через рух UE, а fc - несуча частота. У цьому моделюванні AUE дорівнює 10ppm, $DSSat$ - це максимальний доплерівський зсув для супутника LEO на вказаній висоті, як показано в таблиці 3.1, $fc = 2$ ГГц (S-діапазон) і DS:

$$DSue = fc \times V \times \cos \frac{\theta}{c} \quad (2)$$

де V - швидкість UE, θ - кут між вектором швидкості UE та напрямом поширення сигналу між UE та супутником, c - швидкість світла.

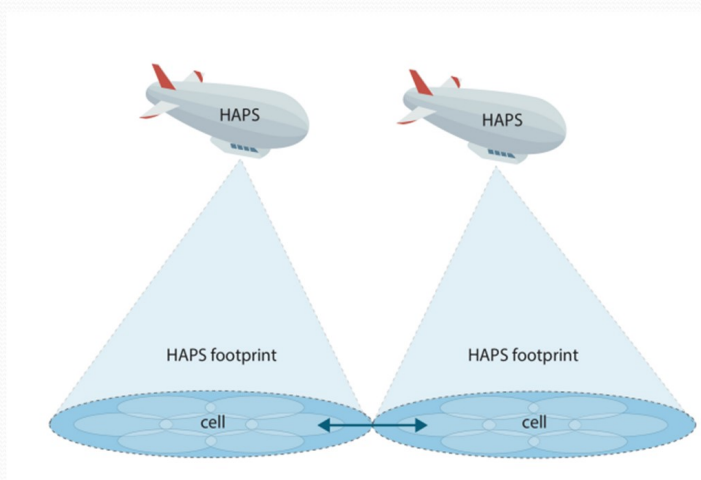
Максимальна затримка та доплерівське зрушення для супутника LEO

Параметри \ Висота	LEO на 600 км	LEO на 1200км
Затримка	6.44 мс	10.44 мс
Допплерівський зсув	± 48 кГц	± 42 кГц

Затримка поширення сигналу для супутникових систем GEO

Кут піднесення	Лінія	Висота, км	Час, мс
UE: 10°	Супутник - UE	40586	135.286
GW: 5°	Супутник - шлюз	41125.6	137.088
90°	Супутник - UE	35786	119.286
Затримка в один бік	Шлюз - супутник - UE	81712.6	272.375
Round trip Time	В обох напрямках	163425.3	544.751

Станція на висотній платформі



Порівняння продуктивності супутникових систем наступного покоління

	Оптоволокно	LTE	Стільниковий зв'язок в ММД	Традиційний GEO/MEO супутниковий зв'язок	LEO HTS супутниковий зв'язок (StarLink)	FSO
Смисність	Необмежено	До 3 Гбіт/с	Теоретично до 100 Гбіт/с	50-100 Мбіт/с (GEO) 100-80 Мбіт/с (MEO)	1-5 Гбіт/с	До 30 Гбіт/с
Затримка передачі даних	Наднизька затримка	До 3 мс	До 0,01 мс	Висока затримка 400 мс (GEO) 135 мс (MEO)	Близько 20 мс	0,005 мс
Вимоги	Доступ до місцевих інфраструктур (над або під землею)	Обмежений спектр (смуги пропускання частот від 1,4 МГц до 20 МГц)	Спектр 1-100 ГГц	Ліцензія на земні станції	Ліцензія на земні станції	Довжина хвилі 1550 нм
Чинники вартості	Змінна вартість за кілометр Тривалий час розгортання	Теоретична межа в 1 Гбіт/сек - від 3,2 км (2600 МГц) до 19,7 км (450 МГц). Фіксована вартість за канал + повторювач	Обмеження розмірів стільників (100- 150 м). Межі зовнішнього та внутрішнього (в будівлі) використання	Фіксована вартість – швидке розгортання Висока змінна вартість за Мбіт/с Незалежність від відстані	Фіксована вартість – дуже швидке розгортання Низька змінна вартість за Мбіт/с Незалежність	Висока захищеність каналу Швидке розгортання
Місцевість	Збільшує вартість прокладання за межами міської забудови	Впливає на кількість необхідних повторювачів . Збільшує вартість обслуговування	Поширюється в межах прямої видимості	Не впливає	Не впливає	Не впливає
Довжина лінії зв'язку, км	Міжконтинент-тальний зв'язок	До 100 км	Для міського сценарію від декількох метрів до 150 м	8046	Теоретично не обмежена	До 15 км для наземних ліній

Висновки

- 1) Інтеграція мереж, що працюють за різними технологіями, та мають різні переваги, призначення, конфігурації можуть забезпечити величезну смугу пропускання для користувачів широкосмугового Інтернету.
- 2) тенденцію до інтеграції космосу та архітектури наземних мереж за допомогою архітектури терабітно-оптичної мережі - “Fibre in the Sky” (укр. волокно в небі).
- 3) нові концепції мережі з акцентом на інтеграцію із наземним NTN мережами та космічними сегментами в оптичному діапазоні можуть надати надзвичайно гнучку та швидкісну телекомунікаційну систему.

Дякую за увагу