

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

## **Пояснювальна записка**

до магістерської кваліфікаційної роботи

**на тему: “АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА ІНТЕГРОВАНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ  
НАЗЕМНИХ ТА СУПУТНИКОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ІЗ  
ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ FSO”**

Виконав: студент 6 курсу, групи ТСДМ-62  
спеціальності

---

172 Телекомунікації та радіотехніка

---

(шифр і назва спеціальності)

---

**Яковець В.П.**

---

(прізвище та ініціали)

Керівник

---

**Кременецька Я.А.**

---

(прізвище та ініціали)

Рецензент

---

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

---

(прізвище та ініціали)

Київ - 2022

# 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

Яковцю Всеволоду Петровичу

1. Тема роботи: “Аналіз та розробка інтегрованих рішень для наземних і супутникових телекомунікацій із застосуванням технологій FSO”, керівник роботи Кременецька Яна Адольфівна, д.т.н., затверджені наказом вищого навчального закладу від «    » \_\_\_\_\_ ..

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_.

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 HAP та UAV.

3. Науково-технічна література.

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

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

2. Конфігурації космічного зв'язку з використанням низькоорбітальних супутників, стратосферних платформ і безпілотних ретрансляторів

3. Результати порівняння ємності каналу Шеннона для різних багаторівневих сценаріїв супутникової лінії зв'язку з використанням технології FSO. Аналіз напрямків досліджень для забезпечення безперервності зв'язку.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Мета роботи;
2. Аналіз напрямків розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій;
3. Основні аспекти технології передачі та розподілу ресурсів у висотних платформах HAP та UAV;
4. Додаткові особливості систем HAPS порівняно з низькоорбітальним (LEO) супутником;
5. Застосування оптичного та радіочастотного спектру в багаторівневій структурі мережі;
6. Застосування технологій FSO в наземних мережевих архітектурах;
7. Архітектура багаторівневого космічного зв'язку з використанням LEO-супутників, HAPS та БПЛА;
8. Параметри моделювання;
9. Моделювання енергетичного бюджету (потенціалу) каналу супутникового зв'язку;
10. Порівняння пропускної здатності багаторівневих систем у вікнах прозорості атмосфери 28-52 ГГц, 70-80 ГГц і в ОД;
11. Порівняння пропускної здатності багаторівневих систем у вікнах прозорості атмосфери 28-52 ГГц, 70-80 ГГц і в ОД;
12. Висновки.

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури		Викон.
2.	Аналіз розвитку та еволюції телекомунікаційних технологій		Викон.
3.	Дослідження аспектів проектування, управління топологією, передачі та розподілу ресурсів в низькоорбітальних системах LEO, HAP та UAV		Викон.
4.	Порівняння ємності каналу Шеннона для різних багаторівневих сценаріїв супутникової лінії зв'язку		Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат		Викон.
6.	Розробка презентації		Викон.

**Студент**

**Яковець В.П.**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

**Кременецька Я.А.**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

“ ”

202\_ року

# ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

по магістерській кваліфікаційній роботі

Студента Яковця Всеволода Петровича

**на тему:** “Аналіз та розробка інтегрованих рішень для наземних і супутникових телекомунікацій із застосуванням технологій FSO”

## Актуальність:

Магістерська робота присвячена аналізу напрямків розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій. Досліджено основні показники для мереж 4G, 5G та 6G, проаналізовано перспективні послуги, додатки, технологічні рішення. Проаналізовано рішення збільшення пропускної здатності та доступності на основі неназемних телекомунікацій та технології FSO. Досліджено аспекти проектування, управління топологією, передачі та розподілу ресурсів в низькоорбітальних системах LEO, висотних платформах NAP та UAV.

## Позитивні сторони:

Проведений аналіз прогнозу FG-NET-2030. Проаналізовано перспективи використання міліметрового та оптичного діапазонів хвиль в різних конфігураціях космічного зв'язку з використанням низькоорбітальних супутників, стратосферних платформ і безпілотних ретрансляторів. Проведено порівняння ємності каналу Шеннона для різних багаторівневих сценаріїв супутникової лінії зв'язку з використанням технології FSO. 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 недостатньо проаналізовано критерії обмеження пропускної здатності каналів зв'язку FSO. 2. На стор. 83 на рис.4.9-4.10 графіків порівняння недостатньо наведено відповідні обчислювальні висновки.

## Висновки:

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку “**відмінно**”, а студент Яковець Всеволод Петрович – присвоєння кваліфікації “Магістр з телекомунікацій та радіотехніки”.

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 Яковець В.П. до захисту магістерської роботи  
(прізвище та ініціали)  
за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(шифр і назва спеціальності)

на тему: Аналіз та розробка інтегрованих рішень для наземних і супутникових телекомунікацій із застосуванням технологій FSO

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор інституту \_\_\_\_\_

(підпис)

Кравченко В.І.

(прізвище та ініціали)

**Довідка про успішність**

Яковець В.П. за період навчання в Навчально-науковому інституті телекомунікацій,  
(прізвище та ініціали)

з 21 року до 21 року повністю виконав (ла) навчальний план за напрямом підготовки, спеціальністю з таким розподілом оцінок за:

національною шкалою: відмінно \_\_\_\_\_%, добре \_\_\_\_\_%, задовільно \_\_\_\_\_%;

шкалою ECTS: A \_\_\_\_\_%; B \_\_\_\_\_%; C \_\_\_\_\_%; D \_\_\_\_\_%; E \_\_\_\_\_%.

Провідний фахівець інституту \_\_\_\_\_

(підпис)

(прізвище та ініціали)

**Висновок керівника магістерської роботи**

Студент Яковець Всеволод Петрович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння аналізувати перспективні та технологічні рішення розвитку супутникових FSO-технологій для реалізації зв'язку на рівні 5G, моделювати та оцінювати продуктивність різних сценаріїв розгортання багаторівневих супутникових систем, 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 Яковець Всеволод Петрович – присвоєння кваліфікації "Магістр з телекомунікацій та радіотехніки".

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Кременецька Я.А.

(прізвище та ініціали)

“ ”

\_\_\_\_\_ 202\_ року

**Висновок кафедри про магістерську роботу**

Магістерську роботу розглянуто. Студент \_\_\_\_\_

Яковець В.П.

(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: 85 с., 22 рис., 4 табл., 26 дж.

*Об'єкт дослідження* – перспективи реалізації наземних телекомунікацій.

*Предмет дослідження* – аналіз методів інтегрування наземних та наземних мереж.

*Мета роботи* – розробка та представлення нових інтегрованих рішень багаторівневих наземних телекомунікацій із застосуванням низькоорбітальних супутників, стратосферних платформ і безпілотних ретрансляторів в міліметровому та оптичному діапазонах.

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

У магістерській роботі аналізуються потенційні можливості, перспективи реалізації, проблеми та їх рішення для наземних телекомунікацій. Розглядається використання міліметрового та оптичного діапазонів хвиль в різних конфігураціях космічного зв'язку з використанням низькоорбітальних супутників, стратосферних платформ і безпілотних ретрансляторів. Проведено порівняння ємності каналу Шеннона для різних багаторівневих сценаріїв супутникової лінії зв'язку. Проаналізовані напрямки досліджень для забезпечення безперервності зв'язку, адаптації до погодних умов, досягнення пропускної здатності до 100 Гбіт/с.

НЕНАЗЕМНА МЕРЕЖА (NTN); 6G; СУПУТНИКОВИЙ ЗВ'ЯЗОК; СТРАТОСФЕРНІ ПЛАТФОРМИ (HAP); БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ (БПЛА); МІЛІМЕТРОВИЙ ДІАПАЗОН; ОПТИЧНИЙ ДІАПАЗОН; ОПТИЧНІ БЕЗПРОВОДОВІ МЕРЕЖІ.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	12
1 АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ МАЙБУТНІХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	15
1.1 Основні аспекти технології передачі та розподілу ресурсів у висотних платформах HAPS та БПЛА .....	17
1.1.1 Нові програми та бізнес-випадки .....	17
1.1.2 Голографічний зв'язок .....	17
1.1.3 Multi-Sense мережі .....	20
1.1.4 Програми, спроектовані з вимогою до часу .....	22
1.1.5 Критична інфраструктура .....	24
2 ОСНОВНІ АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ, УПРАВЛІННЯ ТОПОЛОГІЄЮ, ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ В НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ СИСТЕМАХ LEO .....	26
2.1 Загальне формулювання неназемних мереж .....	28
2.2 Еволюція супутникових сузір'їв та можливостей LEO .....	32
2.3 Основні технічні проблеми та рішення супутникового доступу LEO .....	34
2.3.1 Обслуговування доступу до супутникової мережі.....	34
2.3.2 Аспекти стандартизації.....	38
2.3.3 Супутникові послуги та бізнес-аспекти.....	40
3 ОСНОВНІ АСПЕКТИ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ У ВИСОТНИХ ПЛАТФОРМАХ HAP ТА UAV .....	43
3.1 Висотні платформи HAPS .....	43
3.2 Перспективні варіанти використання систем HAPS в мережах нового покоління .....	45
3.2.1 Макро базова станція, змонтована на HAPS (HAPS-SMBS) .....	50
3.2.2 Варіанти використання систем HAPS-SMBS .....	51
4 ІНТЕГРОВАНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ НАЗЕМНИХ ТА СУПУТНИКОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ FSO .....	64
4.1 Багаторівнева система зв'язку між наземним і не наземними сегментами .....	64

4.2 Застосування оптичного та радіочастотного спектру в багаторівневій структурі мережі .....	66
4.3 Моделювання енергетичного бюджету (потенціалу) каналу супутникового зв'язку .....	69
4.3.1 Моделювання енергетичного бюджету (потенціалу) радіоканалу .....	69
4.3.2 Моделювання втрат в оптичному каналі FSO .....	76
4.4 Порівняння за ефективністю різних конфігурацій багаторівневої супутникової системи зв'язку між наземним і неназемними сегментами .....	78
ВИСНОВКИ .....	84
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	86
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ .....	88



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА	Безпілотний літальний апарат
ІКТ	Інформаційно-комунікаційні технології
ММД	Міліметровий діапазон
ММХ	Міліметрові хвилі
ОД	Оптичний діапазон
AR	Augmented Reality – Доповнена реальність
ARPU	Average Revenue Per User – Середній дохід на користувача
BS	Base Station – Базова станція
BER	Bit Error Ratio – Відношення бітових помилок
CL	ClutterLoss – Втрати через перешкоди
CAV	Connected Autonomous Vehicle – З’єднаний автономний транспортний засіб
COTS	Commercial Off-The-Shelf – Комерційно готові до використання компоненти
DVB	Digital Video Broadcasting – Цифрове відеомовлення
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power – Еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність
eMBB	enhanced Mobile Broadband – Поліпшений мобільний широкосмуговий зв’язок
ESIM	Earth Station in Motion – Рухома земна станція
ETSI	European Telecommunications Standards Institute – Європейський інститут телекомунікаційних стандартів
FSO	Free-Space Optics – Оптика вільного простору (безпроводова оптика)
FSPL	Free Space Propagation Loss – Втрати у вільному просторі

GEO	Geostationary Earth Orbit – Геостационарна навколоземна орбіта
GMR	GEO-Mobile Radio Interface – GEO мобільний радіоінтерфейс
HAP	High Altitude Platform – Стратосферна платформа
HTC	Holographic-Type Communication – Зв'язок голографічного типу
HAPS	High Altitude Platform Station – Станція на стратосферній платформі
HEO	Highly Elliptical Orbit – Висока еліптична орбіта
IoT	Internet of Things – Інтернет речей
ISL	Inter-Satellite Link – Міжсупутниковий канал
ITS	Intelligent Transportation System – Розумна транспортна система
LAP	Low Altitude Platform – Низьковисотна платформа
LEO	Low Earth Orbit – Низька навколоземна орбіта
LOS	Line-of-Sight – Пряма видимість
LTE	Long Term Evolution – Довготерміновий розвиток
ML	Machine Learning – Машинне навчання
MR	Mixed Reality – Змішана реальність
MEO	Medium Earth Orbit – Середня навколоземна орбіта
MNO	Mobile Network Operator – Оператор мобільного зв'язку
MIMO	Multiple Input Multiple Output – Множинний ввід та вивід
mMTC	massive Machine-Type Communications – Масовий міжмашинний зв'язок
NTN	Non-Terrestrial Network – Неназемна мережа
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access – Неортогональний множинний доступ

QoS	Quality of Service – Якість наданих послуг
RAN	Radio Access Network – Мережа радіодоступу
SF	ShadowFading – Тіньове загасання
SDN	Software Defined Networking – Програмно-конфігурована мережа
SDR	Software Defined Radio – Програмно-конфігурована радіосистема
SNO	Satellite Network Operator – Оператор супутникового зв'язку
SNR	Signal-to-Noise – Відношення сигнал/шум
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio – Відношення сигнал/перешкода плюс шум
SMBS	Super Macro Base Station – Супер макро-базова станція
SWAP	Size, Weight and Power – Розмір, вага та потужність
TRL	Technology Readiness Level – Рівень технологічної готовності
UE	UE User Equipment – Обладнання користувача
UAS	Unmanned Aerial System – Безпілотна повітряна система
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications – Наднадійний зв'язок з малою затримкою
VR	Virtual Reality – Віртуальна реальність
VNF	Virtualization Network Function – Мережева функція віртуалізації
VSAT	Very Small Aperture Terminal – Термінал з дуже малою апертурою
3GPP	3rd Generation Partnership Project – Проект партнерства третього покоління

## ВСТУП

Поширення інтелектуальних пристроїв та безпроводових додатків з вимогою до збільшення якості передачі призводять до необхідності розширення радіочастотної робочої смуги. Поки рішенням для розгортання мереж наступних поколінь в містах є ущільнення стільникових вузлів з транзитними волоконно-оптичними з'єднаннями високої пропускної здатності. Однак розгортання мереж в малонаселених районах і на великих відстанях з високою пропускною спроможністю залишається проблемою. На сьогодні найбільш продуктивними по пропускній здатності є волоконно-оптичні системи, для яких граничні експериментальні швидкості складають сотні Тбіт/с, але ще не дозволяють в глобальному масштабі реалізувати якість технологій 5G і наступних поколінь. Можливим вирішенням цієї проблеми є багаторівнева система зв'язку, яка об'єднує наземні та неназемні системи телекомунікацій. Завдяки технічному прогресу в області супутникових технологій реалізуються на дані момент проекти низькоорбітальних систем (LEO). Kuiper від Amazon, Starlink від SpaceX і OneWeb – це три з основних проектів угруповань супутників LEO наступного покоління, які в даний час розробляються, і всі вони обіцяють забезпечити високошвидкісне широкосмугове з'єднання з малою затримкою по всьому світу. В нових проектах LEO передбачається застосування міліметрового діапазону (ММД) та оптичного діапазону (ОД) [1-7]. Можливість підключення до супутникової мережі може бути поліпшена за рахунок використання каналів зв'язку в ММД і ОД між супутниками. Це призведе до збільшення пропускної здатності телекомунікаційних систем, а також можливості ретрансляції даних з супутника спостереження Землі на землю через супутник-ретранслятор GEO, що забезпечує потік даних в реальному часі і зводить до мінімуму кількість наземних станцій, необхідних для надання послуг в системі. Використання ОД і ММД в космосі має ще більший потенціал

у порівнянні з наземними системами, так як відсутність фізичної середовища поглинання сигналу дозволить отримати високу швидкість передачі інформації. В даний час основний упор робиться на використанні лазерного зв'язку для зв'язку Землі і супутників Землі. Волоконно-оптичні та оптоелектронні технології також розглядаються ефективним рішенням для реалізації міліметрових технологій зв'язку, а також у формування гібридними оптоелектронними (фотонними) методами спрямованого випромінювання в фазованих антенних решітках. Методи конвертації міліметрового радіочастотного діапазону в оптичний діапазон є перспективним способом збільшення пропускної здатності гібридних волоконно-ефірних наземних систем зв'язку [8-10].

Тому з'явилися напрями досліджень в області об'єднання гетерогенних технологій, включаючи наземні безпроводові, волоконно-оптичні та неназемні (супутникові, стратосферні, безпілотні) системи зв'язку. Об'єднання таких технологій із використанням міліметрового діапазону хвиль може забезпечити високу пропускну здатність і широкий географічний обхват, незважаючи на дуже великі відстані передачі і сильне загасання на цих частотах. Також дослідникам стало зрозуміло, що для реалізації супутникового інтернету необхідно створення повністю інтегрованих неназемних і наземних мереж. Тому буде доцільним проаналізувати можливі варіанти архітектури таких багаторівневих в фізичному плані телекомунікаційних систем, визначити технологічні та фізичні обмеження за площею покриття, пропускну здатністю, іншими параметрами та можливостями.

Представлений в роботі аналіз багаторівневої системи зв'язку, в яку входять стратосферні платформи (HAPS), безпілотні ретранслятори (БПЛА) та супутники на низькій навколоземній орбіті (LEO), та в якій для зв'язку між землею та телекомунікаційними вузлами застосовується міліметровий діапазон (ММД), а для зв'язку між стратосферними платформами та супутниками –

оптичний (ОД), дозволить оцінити перспективи практичного масового застосування таких систем зв'язку в сценаріях щільної міської забудови, де необхідність надання високошвидкісного зв'язку для підтримки важливих послуг в будь-яку погоду є критичною.

## 1 АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ МАЙБУТНІХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В останні роки інновації у сфері хмарних обчислень, мультимедіа з високою роздільною здатністю, мобільних мереж, сенсорних технологій тощо сприяли створенню абсолютно нового набору додатків та галузевих вертикалей. Сьогодні, за рік до наступного десятиліття, ми опинилися на стадії трансформації, коли розробники додатків не вагаючись використовують технології з якомога більшої кількості дисциплін. Вони не дискримінують, чи будуть ці програми використовуватися людьми, чи фізичними, цифровими чи віртуальними об'єктами.

В епоху стрімкого прогресу в галузі технологій, мережеве співтовариство стикається з постійним викликом зрозуміти, які вимоги кожного сегмента ринку і як визначити, що мережі повинні робити, щоб відповідати запитам нових галузевих вертикалей.

Мережі мобільного зв'язку 5G вже розгортаються по всьому світу. 5G підтримує поліпшений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB) для забезпечення пікової швидкості передачі даних до 10 Гбіт/с. Крім того, наднадійний зв'язок з малою затримкою (uRLLC) зводить до мінімуму затримки до 1 мс, в той час як масовий зв'язок машинного типу (mMTC) підтримує більш ніж в 100 разів більше пристроїв на одиницю площі у порівнянні з 4G. Очікувана надійність і доступність мережі становить понад 99,999%. Програмне забезпечення мережі – це відома технологія 5G, яка забезпечує динамічність, програмованість і абстракцію мереж. Можливості 5G дозволили використовувати нові додатки, такі як віртуальна реальність (Virtual Reality – VR), доповнена реальність (Augmented Reality – AR), змішана реальність (Mixed Reality – MR), автономні транспортні засоби, Інтернет речей (Internet of Things – IoT) і автоматизована промисловість.

Одна з ключових відмінностей між сучасними мережами та майбутніми мережами полягає в тому, що останні будуть базуватися на абсолютно нових технологіях, як апаратних, так і програмних. Вони повинні бути сумісними з нинішнім та майбутніми поколіннями та новими утвореннями космічних мереж.

Очікується, що мережі 6G будуть більш функціональними, інтелектуальними, надійними, масштабованими і енергоефективними, щоб задовольнити всі очікування, які неможливо реалізувати за допомогою 5G. 6G також потрібно для задоволення будь-яких нових вимог, таких як підтримка нових технологій, додатків і нормативних вимог, які виникнуть в найближче десятиліття. 6G відповідно до подання сьогодні: мережі мобільного зв'язку 6G, як очікується, будуть забезпечувати екстремальні пікові швидкості передачі даних більше 1 Тбіт/с. Наскрізні затримки будуть непомітними і становитимуть менше 0,1 мс. Мережі 6G нададуть доступ до потужних периферійних інтелектуальних засобів, у яких затримки обробки даних впадуть нижче 10 нс (рис.1.1)

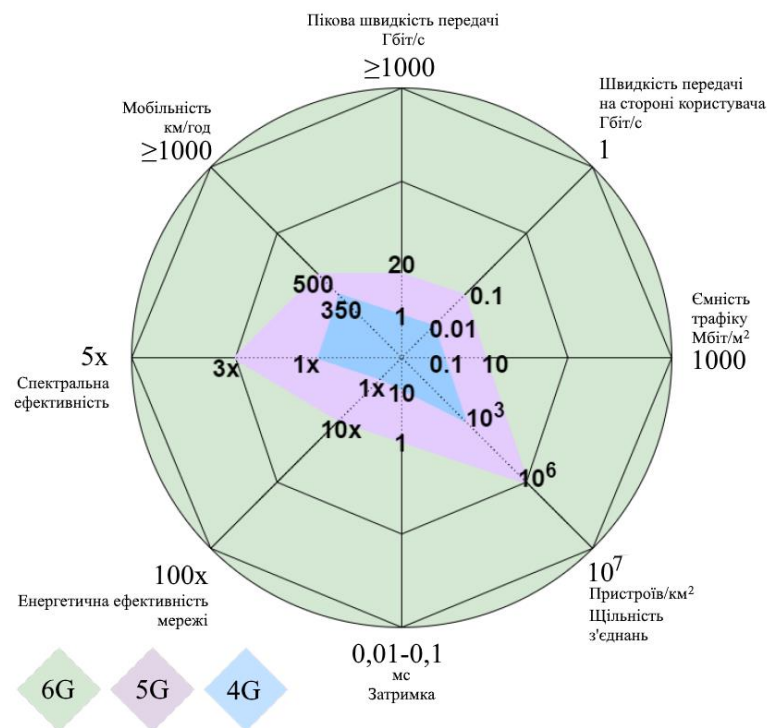


Рис. 1.1. Порівняння основних показників для мереж 4G, 5G та 6G



## **1.1 Основні аспекти технології передачі та розподілу ресурсів у висотних платформах HAPS та БПЛА**

### **1.1.1 Нові програми та бізнес-випадки**

Наступний рубіж у мультимедіа після доповненої реальності та віртуальної реальності (AR/VR) включатиме голографічні медіа та Multi-Sense, включаючи послуги тактильного зв'язку. Незабаром наш досвід роботи з AR/VR визначить, що вони недостатньо реальні, вимагаючи створення нового медіа, не обтяженого HMD, що є набагато більш привабливим та реалістичним через його справжнє відображення об'єкта. Голографічні медіа-програми не обмежуються сферою розваг та телеконференцій, але починають з'являтися більш цікаві програми, деякі з яких впливають на життя (наприклад, теле-хірургія), тоді як інші забезпечують чудову взаємодію (віддалена голографічна присутність).

### **1.1.2 Голографічний зв'язок**

Технологія голографічного дисплея зробила значний прогрес за останні роки, починаючи від дисплеїв світлового поля та закінчуючи різними видами HMD. Оскільки наука та техніка для створення та візуалізації голограм добре зрозумілі, голографічні програми знаходяться на шляху до втілення в реальність. Ці програми включатимуть не лише локальне відображення голограм, але й мережеві аспекти, зокрема можливість передавати та передавати потокові голографічні дані з віддалених сайтів, які називаються «Зв'язок голографічного типу» (НТС).

Далеко не просто технологічний трюк, НТС має багато корисних застосувань. Наприклад, голографічна телеприсутність дозволить віддаленим учасникам проектуватись в вигляді голографічних зображень у кімнату. І навпаки, занурювальні голографічні простори перетворюють артефакти з

віддаленого місця в кімнату, переводячи місцевих користувачів у віддалене місце. Дистанційне усунення несправностей і ремонтні програми дозволять технічним фахівцям взаємодіяти з голографічними візуалізаціями предметів у віддалених і важкодоступних місцях, наприклад, на платформі для буріння нафти або всередині космічного зонда. Голографічні вивіски, які передають голографічний вміст, який централізовано управляється та розповсюджується, є природним наступним кроком для цифрових вивісок. Навчальні та освітні програми можуть надати віддаленим студентам можливість взаємодіяти з предметами та іншими учнями для активної участі у класі. Крім того, є великі можливості у сферах захоплюючих ігор та розваг.

Щоб НТС перетворився в реальність, у майбутньому мережам доведеться вирішувати численні проблеми. Вони повинні забезпечувати дуже високу пропускну здатність через великі обсяги даних, які беруть участь у передачі високоякісних голограм. «Якість» голограми включає не тільки глибину кольору, роздільну здатність та частоту кадрів, як у відео, але також включає передачу об'ємних даних з різних точок зору для врахування зрушень у нахилі, куті та положенні спостерігача щодо голограма («Шість ступенів свободи»). Потік базових об'ємних даних та масивів зображень накладає додаткові вимоги до синхронізації, щоб забезпечити плавні переходи для перегляду для користувача.

## Вперед до голографічного суспільства



Рис. 1.2. Первазичне голографічне медіа

Виходячи за межі потокової передачі голографічної інформації, деякі програми можуть додатково поєднувати голографічні зображення з даними з інших потоків. Наприклад, голографічні аватари можуть поєднувати голографічне зображення з аватаром. Це дозволяє сутності не просто проектувати або візуалізувати її з віддаленого сайту, а передавати інформацію до цієї сутності з цієї віддаленої точки зору. Наприклад, відео- та аудіопотік може бути отриманий з точки зору того, де проектується голограма. Це можна досягти шляхом накладання голограм на відповідні камери, мікрофони чи інші датчики. Для того, щоб це працювало, потрібна чітка синхронізація між кількома потоками даних, але результатом стануть програми, які забезпечують ще більш реалістичне відчуття взаємодії користувачів.

Другий набір розширень стосується поєднання НТС з тактильними мережевими програмами, що дозволяє користувачам «торкатися» голограми. Це відкриває нові можливості для таких додатків, як згадані для навчання та

дистанційного ремонту. Додатки для тактильних мереж накладають вимоги надзвичайно низької затримки (для забезпечення точного відчуття зворотного зв'язку дотику) до базових мереж і, зокрема, що стосується критично важливих програм, таких як віддалена хірургія, не терплять втрат. З'єднання тактильних мереж з НТС вводить додаткові вимоги до високоточної синхронізації, щоб забезпечити належну координацію всіх різних потоків даних.

### 1.1.3 Multi-Sense мережі

При обговоренні мережевих додатків, які включають не тільки оптичне (відео, голограми) та акустичне (аудіо) почуття, але й дотик (тактильне), виникає питання: чому зупинятися на досягнутому; а як щодо інших органів чуття? Дійсно, щоб створити повністю захоплюючі враження, має сенс також залучити почуття запаху та смаку.

На відміну від зору та слуху, нюх і смак вважаються «нижчими» органами почуттів. Як правило, вони не привертають уваги і не керують людською діяльністю, а більше пов'язані з почуттями та емоціями. Це «близькі почуття», оскільки їх сприйняття включає пряму (хімічну) реакцію агента, який сприймається за допомогою рецептора. На відміну від цього, далекі органи чуття (слух і зір) дозволяють сприймати з віддалених джерел, а артефакти передаються хвилями, а не хімічними або фізичними реакціями. Той факт, що відбувається хімічна реакція, створює значну перешкоду для подолання, а саме проблему того, як побудувати ефективні виконавчі механізми. Деякі обмежені успіхи були досягнуті за допомогою «цифрових льодяників», пристроїв, вставлених у рот, які доставляють невеликі струми та перепади температури до сосочків язика (датчики смаку), щоб імітувати такі відчуття, як кислінка, солоність або солодкість. Запах є ще більш складною проблемою. Деякі дослідники запропонували «транскраніальну стимуляцію», тобто набір

електричних магнітів (наприклад, вбудованих у гарнітуру) для доставки стимулів до областей мозку, відповідальних за створення сенсорних відчуттів.

Навіть більше, ніж мережева індустрія, харчова промисловість дуже зацікавлена у проривах у цій сфері. Наприклад, здатність генерувати «цифрову солодкість» обіцяє можливість скоротити використання цукру або штучних підсолоджувачів. Хоча справжні прориви в виконавчих механізмах, які передають цифровий нюх і смак, здаються на даний момент далекими, припускаючи, що ці перешкоди можна подолати, очевидно, будуть цікаві потенційні мережеві програми. Наприклад, рішення для дистанційного навчання, а також цифрова реклама можуть використовувати той факт, що збереження пам'яті можна покращити за рахунок асоціації з запахами та смаками. Цифровий досвід можна покращити, зокрема, оскільки запахи та смаки можуть викликати або посилити емоції. Наприклад, певні зображення можуть бути пов'язані з певним запахом. Хмарні медичні рішення можуть викликати гіркі смаки з віддалених місць, щоб запобігти вживанню певних продуктів у певний час у рамках дієтичного режиму.

На відміну від проблеми з приводом, можна очікувати, що вимоги, що пред'являються сенсорними програмами до мережі, будуть достатньо простими для підтримки. Щоб передати дані про смак і запах, достатньо передати дані, які фактично контактують з рецепторами смаку або запаху – смак і запах сам по собі, а не смак і запах, які випромінює будь-який із багатьох об'єктів у середовищі. Наприклад, щоб передати певний смак у сцені, не обов'язково повідомляти, що потенційно має смак кожен «піксель» кожного об'єкта. Це відрізняється від бачення, де кожен об'єкт у сцені буде відбивати світло, яке сприймає кінцевий користувач. Хоча існують додаткові фактори, що впливають на відчуття смаку, такі як текстура, враховуючи, що кількість рецепторів у язичку (близько 8000) приблизно на 4 порядки менше, ніж кількість рецепторів у сітківці ока (близько 150 мільйонів), обсяг «смакових» даних, які необхідно

передати, буде значно меншим, ніж те, що потрібно для передачі зображень. Крім того, оскільки виявлення смаку в людському тілі може зайняти цілу секунду, жодних особливих вимог щодо підтримки наднизької затримки не висувається. Подібні міркування стосуються даних про аромати, незважаючи на те, що затримка, пов'язана з виявленням ароматів людиною, значно менша.

#### **1.1.4 Програми, спроектовані з вимогою до часу**

Людський інтелект, природно, пристосовується до порушень та непередбачуваних подій і може терпіти певні затримки у передачі інформації. Ми адаптувалися до мережевих послуг, які намагаються докласти максимум зусиль, чекаючи повторного підключення та повторюючи спробу при збоях, і ми здатні обробляти голосові або відеозв'язки, які зазнають втрати пакетів або значного тремтіння. Однак протягом останніх десятиліть у міру розвитку технологій наша залежність від мереж зв'язку зросла. Оскільки ми включаємо все більше пристроїв та гаджетів, швидкі реакції та досвід роботи в режимі реального часу стали основними факторами для безперебійної роботи у повсякденній роботі.

Зокрема, коли ми розглядаємо ринкові фактори, такі як промислова автоматизація, автономна система та великі мережі датчиків, де люди не є кінцевою точкою, фактор часу стає ще більш значним, оскільки більшість машин не запрограмовані на адаптацію: вони спеціально створені для конкретні завдання та детерміновані петлі управління. Точна інженерія не вимагає навчання, пристрої в системі повинні відповідати своєчасності. Ось чому спілкування, спроектоване за часом, має стати важливою темою Network2030.

Те, що вказує на більш високий ступінь складності, – це тип часових атрибутів, які стосуються Network2030. Це стосується не лише відносних

характеристик, таких як швидкий або повільний, але й стосується точного часу події чи доставки даних.

Енергоефективність та використання машин надзвичайно актуальні для економіки виробництва в автоматизації промисловості. Використання максимізується, коли час очікування кожної частини обладнання близький до нуля, а енергія економиться, коли усуваються повторні спроби. Крихітні з'єднані об'єкти в промисловому Інтернеті, такі як контролери з програмною логікою (КПЛ), датчики та виконавчі механізми, повинні виконувати з точністю часу в нижчих цифрах 10 мілісекунд, і часто може знадобитися точність до мілісекунд.

Подібним чином, автономні системи руху навіть на невеликій радіальній відстані в дві милі матимуть з'єднані кінцеві точки порядку десятків тисяч транспортних засобів, сигналів дорожнього руху, вмісту та інших компонентів. Для гармонізації роботи таких щільно взаємопов'язаних механізмів необхідна своєчасна доставка інформації. У цьому випадку корисно знати, в який саме час надходить інформація: все, що надходить рано чи пізно, не має сенсу.

Створення однакових цифрових середовищ у багатосторонніх додатках, таких як онлайн-ігри або віддалена співпраця, вимагатиме справжньої синхронізації об'єктів у системі відліку на кількох сайтах. Новий набір проблем виникає, коли переміщення фізичного об'єкта потрібно буде вчасно координувати між сайтами, які обслуговуються каналами зв'язку, які працюють із різною затримкою.

Оскільки кордони між цифровими об'єктами та об'єктами реального світу розмиваються, нам потрібна система зв'язку, яка може координувати між різними джерелами інформації, щоб усі залучені сторони мали синхронізований погляд на додаток.

### 1.1.5 Критична інфраструктура

Критична інфраструктура відноситься до тих основних активів, які вважаються життєво необхідними для безперервного функціонування суспільства як цілісного утворення.

Незважаючи на те, що кібер- та Інтернет-безпека є центром уваги в нинішніх системах ІКТ, очікування щодо захисту та захисту суспільства від надзвичайних ситуацій за допомогою технологічного прогресу, як очікується, зростуть у наступному десятилітті настільки, наскільки нові можливості будуть потрібні для забезпечення безпечного порятунку суб'єктів у будь-якому місці і в будь-який час у разі будь-якої надзвичайної ситуації. Виявлення цих можливостей також є однією з першочергових цілей Network2030. Забігаючи на перспективу, критичні операції з безпеки повинні враховувати всі особливості суб'єктів, які перебувають у зоні надзвичайної ситуації. Наприклад, завжди мати доступне місцезнаходження, поки не врятують, наводячи його на мережевий пристрій суб'єкта з посиланням на карту місцевості, до якої можна отримати доступ за допомогою навігаційної системи безпечного шляху, та забезпечуючи необхідні дії.

Зокрема, Network2030 повинна визначити, як суб'єкт, пов'язаний з терміналом (наприклад, телефон або планшетний пристрій), буде користуватися послугами, розробленими фахівцями з цих надзвичайних ситуацій для цього предмета та для цього типу надзвичайних ситуацій. Очевидно, що послуги, орієнтовані на час, згадані раніше, є засобами підтримки; крім того, необхідно додатково вивчити, що передбачає розвиток таких послуг у неоднорідних, незалежних інфраструктурах. Проблема, яку такі послуги могли б вирішити, з кожним роком стає все більш гострою та актуальною однаково для розвинених країн та країн, що розвиваються. Це пояснюється як природними причинами, так і основними напрямками розвитку світу: спостерігається зростання



активності глобальних процесів, таких як землетруси, повені тощо; існує тенденція до урбанізації населення; відбувається поглиблення співпраці всередині та між національними державами, що посилює зустрічний потік товарів та населення; зростає використання територій країн, розташованих у субтропічних та тропічних зонах.

Ключові комунікаційні технології, що пропонуються для майбутніх мереж представлено на рис. 1.3.

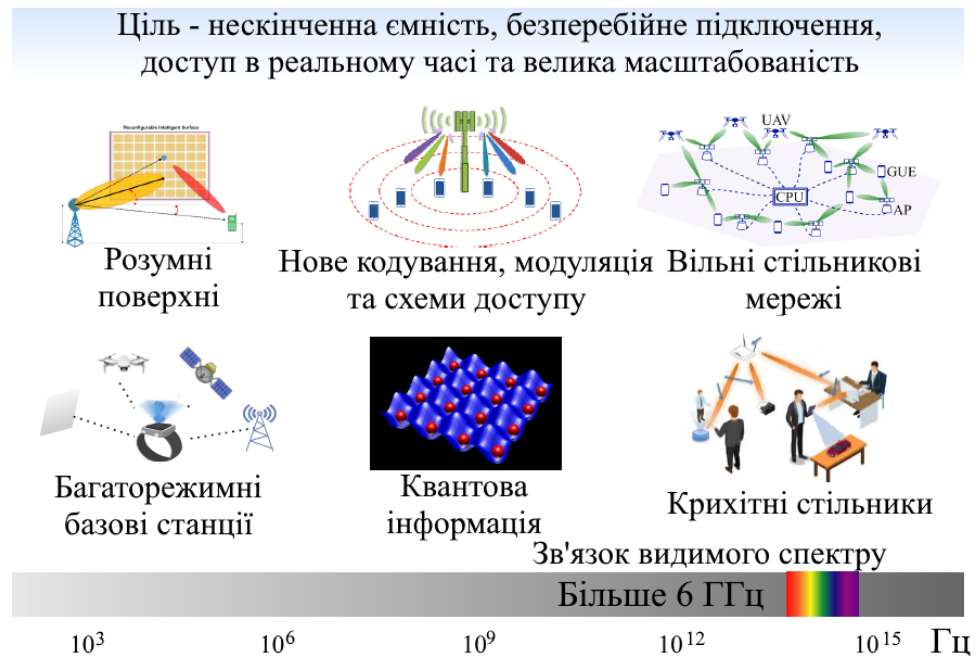


Рис. 1.3. Ключові комунікаційні технології, що пропонуються для майбутніх мереж

Очікується, що в 2030-х роках з'явиться ще кілька нових ініціатив, таких як мобільні технології 5G та/або шостого покоління (6G). Тоді позиціонування Network2030 має бути уточнене щодо досягнень мобільного зв'язку. Network2030 – це технологія, що пов'язана з фіксованою мережею. Вона потребуватиме більш комплексного погляду на майбутню еволюцію мережі, с оглядом на програми та послуги, актуальні в даний період часу та за його межами.

## **2 ОСНОВНІ АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ, УПРАВЛІННЯ ТОПОЛОГІЄЮ, ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ В НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ СИСТЕМАХ LEO**

У міру того, як комерційні системи п'ятого покоління (5G) розгортаються по всьому світу, фокус досліджень починає поступово зміщуватися в бік систем шостого покоління (6G), які, як очікується, здійснять ще один гігантський стрибок в сфері комунікацій. Зв'язок з мега-угрупованнями супутників на низькій навколоземній орбіті (LEO) стане одним з нових рубежів зв'язку на шляху до 6G, доповнюючи наземні мережі для забезпечення глобального покриття.

LEO – це орбіта з центром на Землі і висотою від 200 км до 2000 км над рівнем моря. У порівнянні з аналогами із середньою навколоземною орбітою (MEO) або геостаціонарною навколоземною орбітою (GEO), близькість LEO до Землі призводить до меншої затримки доступу до супутників LEO, меншої кількості енергії для запуску і меншої потужності для передачі сигналу від і до супутників. Однак супутники LEO на висоті 600 км рухаються зі швидкістю близько 7,8 км/с. Швидке переміщення супутників на низькій навколоземній орбіті і відносно обмежена зона покриття окремого супутника на низькій навколоземній орбіті вимагають наявності великого угруповання супутників для забезпечення безперервності обслуговування в цільовій зоні покриття.

За останні кілька років відродився інтерес до космічних Інтернет-сервісів, особливо до мега-угруповань LEO-супутників, таким як SpaceX Starlink, Amazon Kuiper і OneWeb. Поновлення інтересу до супутникового доступу на LEO сприяло появі декількох факторів. Ключовим фактором є значне зниження вартості запуску з появою підриєвних пускових установок, що повторно використовують частини ракет, як це передбачено, наприклад, в SpaceX. Тим часом, використання готових компонентів (COTS) і прийняття принципів бережливого виробництва при проектуванні і виробництві супутників

дозволяють масове виробництво з більш швидким виробничим циклом при менших витратах. Також стало комерційно можливим використовувати передові технології супутникового зв'язку, такі як технології багатоточкових променів і складної бортової цифрової обробки. Ще один ключовий фактор – це велика готовність інвестувати в супутниковий доступ на LEO, щоб допомогти з'єднати тих непідключених, мотивованих комерційним потенціалом, економічним розвитком і гуманітарними міркуваннями щодо подолання цифрового розриву.

Проект партнерства третього покоління (3GPP) працює над адаптацією систем 5G для підтримки супутникового зв'язку. Розвиток 5G для підтримки доступу до LEO-супутників ґрунтується на гнучкості, властивій системам 5G. Першим завданням проектування є підключення мобільних пристроїв 5G до супутникових мереж доступу на основі 3GPP у діапазоні частот нижче 6 ГГц, щоб можна було забезпечити підключення 5G у областях, де наземні мережі 5G недоступні. Друга мета проекту – забезпечити широкосмугове з'єднання для більш досконалих пристроїв, таких як термінал з дуже малою апертурою (VSAT) або наземна станція (ESIM), що рухається, особливо на більш високих частотах (наприклад, діапазони Ku/Ka). Крім прямого супутникового доступу, 3GPP також працює над супутниковим транспортним зв'язком 5G, який може полегшити пропозицію стільникових послуг у тих областях, де наземні транспортні засоби неможливо або надто дорого побудувати.

Спочатку 5G був розроблений для наземного зв'язку без урахування доступу до супутників на низькій навколоземній орбіті. Ми очікуємо, що будуть лише помірні покращення специфікацій, що дозволять 5G підтримувати доступ до супутників LEO, що призведе до неоптимальних характеристик. Крім того, більшість функцій 5G, ймовірно, будуть недоступні для супутникового доступу LEO в епоху 5G. Інтеграція наземних мереж 5G із супутниковим доступом на LEO буде нецільною. Навпаки, ми очікуємо, що інтеграція в 6G стане набагато

тіснішою, забезпечуючи безперешкодну мобільність між наземними та супутниковими мережами доступу LEO. Як показано на рис. 2.1, тісна інтеграція наземних мереж із супутниковим доступом на LEO матиме важливе значення для досягнення глобального покриття в епоху 6G.

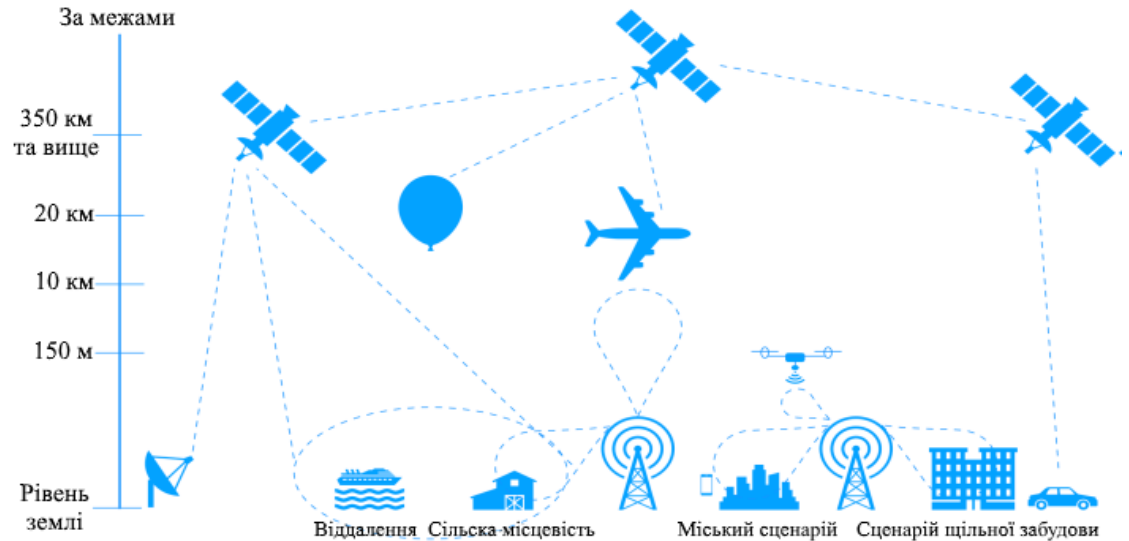


Рис. 2.1. Покриття 6G, що забезпечується щільною інтеграцією наземних мереж із супутниковим доступом LEO

На рис. 2.1 також показано загальну архітектуру мережі доступу до супутників LEO, яка складається з фідерної лінії, що з'єднує шлюз та супутник, службової лінії, що з'єднує супутник і термінал, та міжсупутникового каналу (Inter-Satellite Link – ISL), що з'єднує один супутник з іншим.

Ажіотаж із приводу космічних Інтернет-послуг часто затьмарений міфами та помилками. Є проблеми від технології до бізнес-моделі, з якими стикається розвиток супутникового доступу на LEO за допомогою мега-угруповань.

## 2.1 Загальне формулювання неназемних мереж

Під неназемною мережею розуміється мережа або сегмент мереж, що використовує радіочастотні ресурси на борту супутника (або платформи чи

БПЛА). Типовий сценарій неназемної мережі, що забезпечує доступ до обладнання, показаний нижче:

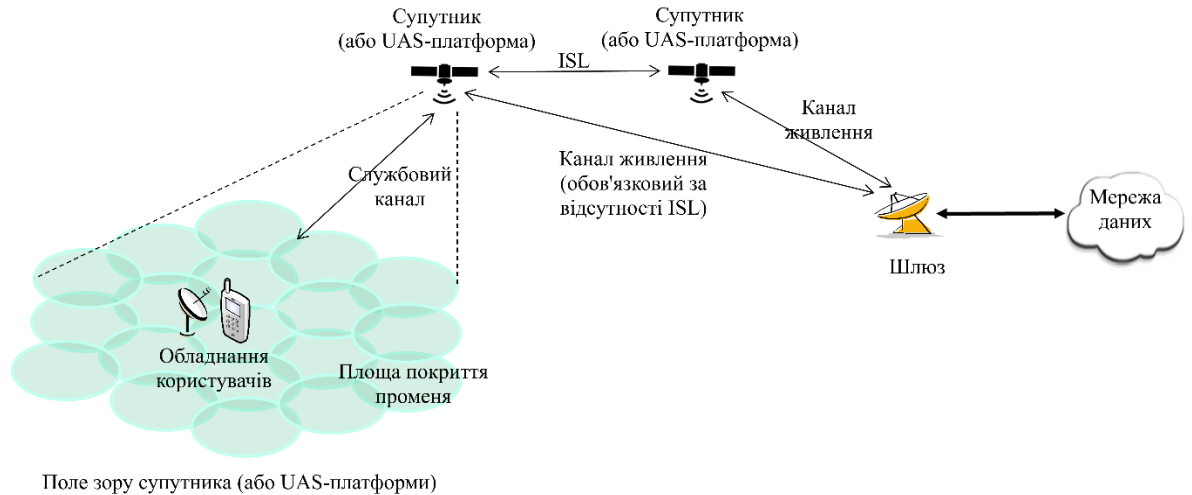


Рис. 2.2. Типовий сценарій розгортання мереж на основі супутника

Неназемна мережа зазвичай складається з таких елементів:

- Один або кілька супутникових шлюзів, які з'єднують неназемну мережу із загальнодоступною мережею передачі даних.
- Супутник GEO отримує живлення від одного або декількох супутникових шлюзів, які розгорнуті в цільовому супутниковому покритті (наприклад, регіональному або навіть континентальному). Ми припускаємо, що UE в стільнику обслуговується лише одним супутниковим шлюзом.
- Не-GEO супутник послідовно обслуговується одним супутниковим шлюзом за раз. Система забезпечує безперервність обслуговування та фідерної лінії між послідовними обслуговуючими супутниковими шлюзами з достатньою тривалістю часу для переходу до прив'язки та передачі обслуговування мобільності.
- Фідерна лінія або радіозв'язок між супутниковим шлюзом та супутником (або платформою БПЛА).

- Службовий канал або радіоканал між користувальницьким обладнанням та супутником (або платформою БПЛА).
- Супутник (або платформа БПЛА), який може реалізовувати як прозоре, так і регенеративне (з бортовою обробкою) корисне навантаження. Супутник (або платформа БПЛА) генерує промені, зазвичай генерує кілька променів у заданій зоні обслуговування, обмеженої його полем огляду. Сліди балок зазвичай мають еліптичну форму. Поле зору супутників (або платформ БПЛА) залежить від схеми бортової антени та мінімального кута місця.
- Прозоре корисне навантаження: фільтрація радіочастот, перетворення та посилення частоти. Отже, сигнал форми сигналу, що повторюється корисним навантаженням, не змінюється;
- Рекуперативне корисне навантаження: радіочастотна фільтрація, перетворення та посилення частоти, а також демодуляція/декодування, перемикання та/або маршрутизація, кодування/модуляція. Це фактично еквівалентно наявності всіх або частини функцій базової станції (наприклад gNB) на борту супутника (або платформи UAS).
- Міжсупутникові канали (ISL) за бажанням у разі угруповання супутників. Це вимагатиме регенеративного корисного навантаження на борту супутників. ISL може працювати у радіочастотному або оптичному діапазонах.
- Обладнання користувача обслуговується супутником (або платформою БПЛА) в цільовій зоні обслуговування.

Таблиця 2.1

## Типи NTN-платформ

Платформи	Діапазон висот	Орбіта	Типовий розмір променя
Супутник на низькій навколоземній орбіті (LEO)	300-1500 км	Діаметр орбіти навколо Землі	100-500 км
Супутник на середній навколоземній орбіті (MEO)	7000-25000 км		100-500 км
Супутник на геостаціонарній навколоземній орбіті (GEO)	35786 км	Умовна станція, що зберігає фіксоване положення по куту місця/азимута по відношенню до даної точки землі	200-1000 км
UAS-платформа (включ. HAPS)	8-50 км		5-200 км
Супутник на високій еліптичній орбіті (HEO)	400-50000 км	Еліптична орбіта	200-1000 км

Зазвичай:

- Супутник GEO та БПЛА використовуються для надання послуг континентального, регіонального чи місцевого значення.
- Сузір'я LEO та GEO використовується для надання послуг як у Північній, так і у Південній півкулях. У деяких випадках угруповання може забезпечити глобальне покриття, включаючи полярні регіони. В останньому випадку це вимагає відповідного нахилу орбіти, достатньої кількості променів, що генеруються, і міжсупутникових ліній.

## 2.2 Еволюція супутникових сузір'їв та можливостей LEO

Зразкові ранні системи LEO включають Iridium та Globalstar, перші покоління яких були запуснені у 1990-ті роки. Сузір'я Iridium складалося з 77 супутників на висоті 780 км. Сузір'я Globalstar складалося з 48 супутників на висоті приблизно 1400 км. Обидві супутникові системи були розроблені для обслуговування певних мобільних терміналів з мобільними послугами другого покоління (2G), з допомогою як дзвінків так і обміну короткими інформаційними повідомленнями зі швидкістю до 14,4 кбіт/с. Цікаво, що можливості бортових супутників були досить розвинені для того періоду, особливо для Iridium, оскільки кожен космічний корабель був обладнаний чотирма ISL, що підтримують зв'язок із суміжними супутниками зі швидкістю 10 Мбіт/с, та високошвидкісні процесори для маршрутизації голосових та інформаційних з'єднань.

З багатьох причин (як технічних, так і комерційних) системи LEO, запуснені в 1990-х роках, не були такими успішними, як очіувалося, тому що вони забезпечували голосовий зв'язок і передачу даних лише обмеженій кількості користувачів. Але це змінюється завдяки широкому спектру сценаріїв використання 5G і новим ринковим можливостям. Відродився інтерес до використання мега-угруповань LEO-супутників для забезпечення зв'язку з космосу. Деякі нові угруповання, такі як OneWeb, Starlink, AST SpaceMobile, Amazon Kuiper та TeleSat, запланували запуснути сотні чи тисячі космічних апаратів для забезпечення глобального зв'язку, доповнюючи наявні наземні мережеві інфраструктури. Дизайн цих нових мега-угруповань визначається цільовим сценарієм використання та ринковим сегментом. Відповідно до доступного спектру, виділеного рухомим супутниковим службам нижче 6 ГГц, супутникова система LEO буде в основному орієнтована на пристрої та послуги Інтернету речей (IoT) з низько-середніми швидкостями передачі даних



безпосередньо на портативні термінали. Що стосується супутникового спектру на більш високих частотах (наприклад, діапазонах Ku/Ka), нові супутникові угруповання LEO будуть націлені на широкосмуговий зв'язок з більш досконалими пристроями, такими як VSAT або ESIM.

Рівень технологічної готовності (Technology Readiness Level – TRL) для багатьох чинників технологічного забезпечення є досить високим. Справді, на LEO-орбіті вже знаходиться понад 1600 супутників Starlink. Критичним аспектом технологій, придатних до використання у космосі, є TRL для конкретних проектних вимог. Наприклад, тепер доступні технології бортових активних антен, які встановлені на супутнику Starlink та мають індивідуально настроювані керувані промені. Кількість променів у супутнику Starlink може змінюватись від 8 до 32. Але для наступних мегасузір'їв LEO можуть знадобитися більші масиви або більша кількість антенних елементів, що вимагатиме подальшої оптимізації та інтеграції в корисне навантаження.

Деякі з ключових технологічних аспектів пов'язані з наданням нових придатних для використання в космосі радіочастотних (RF) та мікрохвильових компонентів, таких як високоефективні підсилювачі потужності на основі технологій нітриду галію (GaN) та кремнію-германію (SiGe), тобто забезпечення економічної інтеграції радіочастотних структур. Інші передові методи, такі як повністю цифрове формування діаграми спрямованості та схеми перемикання променя, також є важливими факторами, які слід враховувати при оптимізації конструкції корисного навантаження супутника в залежності від потужності, маси та доступного бюджету витрат для конкретної цільової послуги та попиту на трафік.

Архітектура корисного навантаження наступного покоління буде використовувати активні антени та вбудовані цифрові процесори, щоб забезпечити високу динамічну гнучкість для зміни несучих частот, ширини смуги на кожен несучу, виділених потужностей на кожен промінь і навіть майже

миттєвої зміни компонування променів, а також спільно з стрибкоподібною перебудовою променів. Це означає, що система управління радіоресурсами повинна справлятися з багатьма ступенями свободи в дуже обмеженому середовищі, щоб знайти найкращий розподіл ресурсів на системному рівні. Зверніть увагу, що через динамічність системи із супутниками, що рухаються щодо землі та один одного, кожна схема розподілу майже щоразу потребує перерахунку. Відповідні алгоритми керування радіоресурсами є ключовими факторами, що забезпечують ефективність сузір'я LEO.

### **2.3 Основні технічні проблеми та рішення супутникового доступу LEO**

Основні проблеми доступу до супутників на LEO виникають через швидкий рух супутників на LEO, що призводить до затримок розповсюдження, що змінюються в часі, великим доплерівським зсувам, що змінюються в часі, і певним типам осередків (квазіземні фіксовані або рухомі по Землі стільники). У цьому розділі ми обговорюємо ключові рішення щодо цих проблем.

Для початку підсумуємо зразкові параметри для супутників LEO, що працюють у діапазоні S (тобто 2 ГГц) і на висоті 600 км. Очевидно, що портативні UE супутникового наведення на LEO (наприклад, смартфони) мають відносно високі значення ефективної щільності ізотропної випромінюваної потужності (EIRP) та відношення коефіцієнта посилення антени до шумової температури (G/T). Навпаки, супутник LEO, орієнтований на підключення до Інтернету речей, може бути менш потужним.

#### **2.3.1 Обслуговування доступу до супутникової мережі**

Швидкий рух супутника на низькій навколоземній орбіті на висоті 600 км може призвести до сильного зсуву доплерівського порядку 24 ppm (тобто  $\pm 48$

кГц на несучій частоті 2 ГГц). Доплерівський зсув вище, ніж типова початкова похибка генератора UE, що становить близько 10 ppm. Помилка частоти, яку UE спостерігає в низхідній лінії зв'язку, є комбінацією доплерівського зсуву та зсуву частоти (через невідповідність кварцового генератора). UE може отримувати тимчасову та частотну синхронізацію в низхідній лінії зв'язку з використанням сигналів синхронізації, незважаючи на сукупну помилку частоти. Однак UE в одній і тій же соті можуть налаштовувати свої місцеві опорні частоти на різні частоти через різні доплерівські зсуви. Якщо частота сигналу низхідній лінії зв'язку використовується як опорна частота для передачі по висхідній лінії зв'язку, сигнали висхідної лінії зв'язку різних UE будуть зміщені по частоті в приймаючому мережному вузлі.

Супутникову орбіту можна повністю описати за допомогою шести параметрів у різних уявленнях. При відомих положеннях і швидкостях супутника та UE, UE може визначати доплерівські зсуви низхідної та висхідної ліній зв'язку та затримку поширення службової лінії зв'язку. На основі оцінок перед початковим доступом UE може налаштувати свою частоту висхідної лінії зв'язку і застосувати випередження синхронізації при передачі по висхідній лінії зв'язку, що допомагає досягти ортогональності множинного доступу висхідної лінії зв'язку. Рух обслуговуючого LEO-супутника вимагає, щоб UE безперервно відстежувало необхідне тимчасове випередження та регулювання частоти. Для супутника LEO, націленого на IoT, односторонній дрейф затримки і дрейф доплерівського зсуву можуть становити до 46 мкс і 641 Гц/с, відповідно (що більше, ніж у аналогів у портативних UE для націлювання на супутник LEO. через більшу площу покриття променя). Отже, UE необхідно прогнозувати положення та швидкість супутника, затримку поширення та доплерівські зсуви в момент часу, відмінний від еталонного часу, пов'язаного з ефемеридами супутника.

Прогноз, заснований на розрахунку траєкторії супутника, в цілому погіршується зі збільшенням віку використовуваних ефемерид даних з різних причин, включаючи опір атмосфери, маневрування супутника, недосконалість орбітальних моделей, що використовуються, і т.д. Управління мобільністю включає UE в режимі очікування і UE в підключеному режимі. Мобільність в режимі очікування включає вибір і повторний вибір стільника, відстеження і пошуковий виклик, в той час як мобільність в режимі з підключенням в основному відноситься до передачі обслуговування. У наземних мережах стільники є фіксованими, тоді як UE можуть бути мобільними з різними траєкторіями. Натомість, стільники в мережах доступу до LEO-супутників переміщуються, що призводить до змін обслуговуючих стільників UE в діапазоні від декількох секунд (для стільників, що рухаються по Землі) до декількох хвилин (для квазіземних фіксованих стільників). Це вимагає переосмислення процедур управління мобільністю, які використовуються в наземних мережах.

Щоб полегшити управління мобільністю, UE виконують вимірювання обслуговуючого та сусіднього стільники. Супутникові стільники LEO переміщуються у часі передбачуваним чином, що визначається даними супутникових ефемерид. UE може використовувати ефемеридні дані для прогнозування траєкторії руху супутників LEO у часі та виконувати вимірювання у відповідні моменти часу. Це рішення стандартизується у 3GPP. За результатами вимірювання UE може виконати вибір стільника та повторний вибір у режимі очікування та повідомити результати до мережі, щоб допомогти з керуванням передачею обслуговування у підключеному режимі. Мережа повинна відстежувати UE у режимі очікування, щоб мережа могла оперативно пейджингувати UE. З цією метою мережа надає UE список областей відстеження. Якщо UE переміщується в місце, яке не належить до жодної області відстеження в цьому списку, йому необхідно повідомити мережу за

допомогою оновлення області відстеження. У супутниковій LEO-мережі доступу зі стільниками, що рухаються Землею, якщо зони спостереження переміщуються разом із супутниками, стаціонарне UE має продовжувати виконувати оновлення зони спостереження у режимі очікування, що призведе до значного навантаження на сигналізацію. Одне з рішень, що стандартизується в 3GPP, полягає в тому, щоб визначити зони стеження, які повинні бути закріплені на землі, щоб відокремитися від осередків радіозв'язку.

Супутникова мережа доступу LEO UE в підключеному режимі може потребувати частішої передачі обслуговування. Умовна передача обслуговування може використовуватися зменшення сигналізації передачі обслуговування та підвищення стійкості передачі обслуговування. При умовній передачі обслуговування мережа відправляє команду передачі обслуговування до UE з умовою. UE зберігає команду та застосовує її, коли умова задовольняється. Потім UE виконує передачу обслуговування та підключається до цільового стільника. Більше адаптованих умов передачі обслуговування можуть бути введені в контексті супутникової мережі доступу LEO, як зазначено в 3GPP. Приклади умов можуть використовувати інформацію про місцезнаходження UE, ефемериди супутників та тривалість обслуговування кожного супутника LEO у певній області.

### 2.3.2 Аспекти стандартизації

Більшість супутникових мереж, що діють в даний час, використовують технологію радіодоступу, засновану на стандартах, визначених Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI) (наприклад, цифрове відеомовлення (Digital Video Broadcasting – DVB) або GEO мобільний радіоінтерфейс (GMR)), а також численні пропрієтарні протоколи радіозв'язку. Жоден з цих стандартів не був достатнім для забезпечення взаємодії між постачальниками рішень та не призвів до створення сталої системи. Навпаки, наземні мобільні мережі значно виграли від міжнародних зусиль зі стандартизації, ініційованих 3GPP за останні два десятиліття. Результатом є процвітаюча глобальна мобільна екосистема з системами, продуктами та послугами, що добре працюють.

Завдяки властивій гнучкості конструкції 5G створює унікальну можливість підтримки супутникового зв'язку. Завдяки супутниковому доступу у планах 3GPP визначається глобальний стандарт супутникового зв'язку. Це відкриває двері для інтеграції супутникових компонентів в системах 5G, що сприятиме наданню послуг 5G, особливо в районах за межами покриття стільникового зв'язку. У порівнянні з успадкованим ланцюжком створення вартості супутникового зв'язку цей стандарт на основі 3GPP сприятиме розвитку смартфонів та пристроїв IoT з можливістю мобільності та множинного зв'язку між супутниковим та стільниковим доступом, які можуть забезпечити:

- Бездоганне поєднання супутникового та стільникового доступу для кінцевих користувачів.
- Розгортання та експлуатація мультивендорних систем супутникового зв'язку в космічному сегменті під час розриву зв'язку між мережевою інфраструктурою та постачальниками терміналів.

- Зниження витрат за рахунок інтеграції в систему 3GPP, яка орієнтована на глобальний ринок і сприяє економії за рахунок масштабованості.
- Вбудована підтримка всіх функцій 5G (наприклад, нарізки, енергозбереження, мобільності, стороннього мережевого керування, додатків та сервісних платформ)

Висунуто кілька ініціатив 3GPP з неназемних мереж (NTN), при цьому супутниковий доступ на LEO є основним компонентом. Ініціативи охоплюють безліч областей: від мережі радіодоступу (RAN) до послуг та системних аспектів (SA) до ядра та терміналів (CT). Робота в 3GPP SA стосується як супутникового доступу з радіоінтерфейсом на основі 3GPP, так і супутникового транзитного з'єднання, чий ефірний інтерфейс може бути заснований на 3GPP або на основі 3GPP. 3GPP RAN адаптує вузькосмуговий IoT (NB-IoT) та довготерміновий розвиток (LTE) для машинного зв'язку (LTE-M) для підтримки супутникового доступу. Цей напрямок роботи відомий як IoT NTN та орієнтований на недорогі пристрої IoT з низькою швидкістю обслуговування. 3GPP RAN також розвиває ефірний інтерфейс 5G New Radio (NR) для супутникового доступу на частотах нижче 6 ГГц та вище. Робота в діапазоні частот нижче 6 ГГц спрямована на забезпечення можливості підключення поза приміщеннями безпосередньо до портативних пристроїв, тоді як робота на вищих частотах спрямована на забезпечення підключення до терміналів VSAT або ESIM.

Ми очікуємо, що на шляху до 6G стандартизація, як і раніше, матиме вирішальне значення для успіху систем супутникового зв'язку, включаючи доступ до LEO-супутників. 3GPP постійно працює над розвитком 5G і за кілька років працюватиме над 6G. Очікується, що супутникова індустрія продовжить зусилля стандартизації в 3GPP, щоб просунути інтеграцію супутників у системи 5G і 6G в порівнянні з наступними версіями 3GPP. Постійні зусилля допоможуть забезпечити впровадження нових функцій для підвищення продуктивності та надання нових можливостей.

### 2.3.3 Супутникові послуги та бізнес-аспекти

Найближчими роками передбачається зростання супутникової ємності з високою пропускнуою спроможністю. Використовуючи спектр Ka-, Ku- і V-діапазонів і широку смугу пропускання в гігагерцових межах, супутникова технологія LEO може запропонувати швидкості, які можна порівняти з наземними послугами LTE, для підключення таких пристроїв, як VSAT і ESIM, для послуг фіксованого широкосмугового зв'язку. Однак для таких послуг фіксованого широкосмугового зв'язку на базі LEO потрібні пристрої, оснащені плоскою панеллю або тарілковою антеною з високим коефіцієнтом посилення і можливістю відстеження променя. Вирішення проблем, пов'язаних із вартістю та продуктивністю цих пристроїв, ймовірно, є таким же складним технічним завданням, як і виведення на орбіту супутникових угруповань. В областях, де є оптоволокну або високошвидкісний кабель, вони не можуть конкурувати. Але за межами цих областей мережі LEO, що пропонують фіксований широкосмуговий зв'язок, ймовірно, будуть конкурентоспроможними, також з урахуванням швидшого часу до обслуговування.

Технології 5G на основі 3GPP та майбутні технології 6G можуть обіцяти відкрите середовище, в якому пристрої можуть підключатися до супутникових систем мобільного широкосмугового зв'язку на основі 3GPP. Ми очікуємо, що протягом кількох років буде доступна велика кількість пристроїв 5G з підтримкою NTN, в основному за рахунок оновлень програмного забезпечення в наборах мікросхем та підтримки необхідних спектрів діапазонів. На шляху до 6G пристрої кінцевих користувачів матимуть унікальну можливість безперешкодно переміщатися між стільниковими та супутниковими мережами залежно від угод між операторами місцевих мереж мобільного зв'язку (MNO) та операторами супутникових мереж (SNO). Крім того, використання технології 3GPP для мобільних широкосмугових систем LEO сприятиме інтеграції



супутникових та наземних мережевих технологій для покращення покриття та підвищення відмовостійкості.

В той час як мережі фіксованого широкосмугового супутникового доступу LEO на основі 3GPP можуть бути альтернативою для пропозиції фіксованого широкосмугового підключення до локальних мереж в областях, де немає волоконно-оптичного або високошвидкісного кабелю, мережі мобільного широкосмугового супутникового доступу до LEO на основі 3GPP забезпечують пряме телефонне з'єднання та будуть доповненням для забезпечення так часто «повсюдного» покриття мобільних послуг. Хоча наземні мережі пропонують швидкість передачі даних у 100 Мбіт/с або навіть Гбіт/с, очікується, що мережа на основі LEO, що забезпечує пряме підключення, може забезпечувати швидкість до декількох Мбіт/с для смартфонів з використанням спектру 15 МГц S-діапазону та, таким чином, підтримувати передачу голосу, обмін повідомленнями і т.д. Спеціальні пристрої з вищим коефіцієнтом посилення антени або вищою вихідною потужністю (наприклад ESIM і VSAT) можуть працювати на більш високих швидкостях. У той час як конкурентоспроможне угруповання LEO, що забезпечує пряме підключення кінцевих користувачів для послуг передачі голосу та даних, вимагатиме більшої кількості супутників, послуги вузькосмугового типу IoT можуть підтримуватися з меншими інвестиціями для таких вертикалей, як транспорт, логістика, комунальні послуги, сільське господарство тощо.

Ринок мереж прямого підключення на основі LEO умовно поділяється на два сегменти. Перший сегмент – це гарантоване обслуговування з можливістю підключення у будь-якому місці, де абоненти на розвинених ринках готові платити кілька відсотків додатково за свою щомісячну передплату. Дозволений щомісячний «ліміт даних NTN» може становити близько 100 МБ на місяць. Другий сегмент – це області на ринках, що розвиваються, де абоненти будуть підключатися для базових комунікацій. Середній дохід на користувача (ARPU)

в останньому сегменті відносно невеликий, але все ж таки робить свій внесок у загальний дохід, оскільки LEO-супутники постійно обертаються навколо Землі. Можливість підключення до корпоративного Інтернету речей – це ще одна перспективна можливість, в якій, наприклад, можуть бути підключені контейнери, транспортні засоби та судна. Основні бізнес-сегменти фіксованого широкопasmового зв'язку на базі LEO включають, зокрема, морські та авіаційні послуги.

Основне завдання для майбутніх неназемних мереж: розробка гнучкої мережевої архітектури для інтегрованого наземного доступу та доступу до супутників на низькій навколосемній орбіті. Архітектура повинна підтримувати ефективне балансування навантаження, плавну мобільність та динамічний розподіл ресурсів між наземним та супутниковим доступом LEO. Крім того, архітектура має бути досить гнучкою, щоб підтримувати простоту управління сузір'ями та різні сценарії розгортання супутників LEO з HAPS та БПЛА, можливістю багатоканального підключення, транзитного рейсу тощо.

Випробування та тестові розгортання, що відбуваються в даний час нададуть цінні практичні знання, які допоможуть розробити систему 6G із тісною інтеграцією наземних мереж із супутниковим доступом на LEO.

## **3 ОСНОВНІ АСПЕКТИ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ У ВИСОТНИХ ПЛАТФОРМАХ НАР ТА UAV**

### **3.1 Висотні платформи HAPS**

Станція на висотній платформі (HAPS) – це мережевий вузол, який працює в стратосфері на висоті близько 20 км і відіграє важливу роль у наданих послугах зв'язку. На цих висотах швидкість вітру спадає до мінімуму (близько 10 м/с), зберігаючи відносну постійність напрямку, а повітря має щільність у 30-40 разів менше, ніж у приземному шарі. Передбачалося, що основним польотним режимом при експлуатації стратосферних дирижаблів буде залежність над заданою точкою земної поверхні та дрейф в межах «куба» розміром близько 1×1×1 км. Завдяки технологічним інноваціям в області автономної авіоніки, антенних решіток, рівнів ефективності сонячних панелей і потужності енергії батарей, а також завдяки розвитку галузевих систем та застосуванню HAPS, як найважливішого компонента, для безпроводових систем наступних поколінь.

Як показано на рис. 3.1, вертикальна структура мережі із застосуванням HAPS може декілька варіантів взаємодії:

1) Рівень HAPS, який виступає як великомасштабний інтелектуальний об'єкт, забезпечує швидкий, надійний і ефективний зв'язок на великій відстані між супутниками, минаючи необхідність встановлення мільйонів наземних і морських ретрансляційних станцій.

Він також може функціонувати як розподілений центр обробки даних для запису орбітальних траєкторій супутників, моніторингу попереджень про з'єднання та розрахунку ймовірності зіткнення між супутниками. Своєчасна доступність такої інформації для різних супутникових компаній має життєво важливе значення для збереження функціональних можливостей супутникових

мегагруповань. Крім того, супутники допомагають рівню HAPS покращувати характеристики передачі обслуговування.

2) Рівень HAPS відповідає за управління мобільністю групи безпілотних літальних апаратів (БПЛА) шляхом надання штучного інтелекту, розвантаження важких обчислень та обробки великомасштабних датчиків та моніторингу, які корисні для систем доставки та моніторингу вантажів. Очікується, що комунікаційна платформа буде безперешкодно обробляти різноманітні комунікаційні вимоги, такі як наднадійний зв'язок із малою затримкою (URLLC) та покращений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB).

3) Рівень HAPS забезпечує швидкий доступ до Інтернету та послуги безпроводового зв'язку, такі як IoT та розподілене машинне навчання, для міських, приміських та віддалених районів, знижуючи залежність від наземних та супутникових мереж.

Використання систем HAPS як нових платформ безпроводового доступу для майбутніх безпроводових систем має великий потенціал. Крім того, надання послуг зв'язку/обчислень для безлічі користувачів за запитом і т.д. можна організувати з перспективою для зони покриття від 60 км до 400 км.

Сценарії розгортання мереж з використанням систем HAPS та представлення встановленої на HAPS супер макро-базової станції (SMBS) представляється як перспективне та економічне рішення для задоволення потреб у трафіку в епоху 5G та 6G. На відміну від звичайних макро BS, передбачувана SMBS із встановленим HAPS не тільки збільшує покриття та пропускну здатність, але також підтримує збір, обчислення, кешування та обробку даних у багатьох областях додатків.



Рис. 3.1. Повністю інтегрована вертикальна гетерогенна мережа (VHetNet)

### 3.2 Перспективні варіанти використання систем НAPS в мережах нового покоління

Системи НAPS мають багатообіцяючі переваги перед супутниковим зв'язком, як це узагальнено в таблиці 3.1. Ці переваги зроблять їх незамінним компонентом для безпроводових мереж наступного покоління. Звичайне надання послуг безпроводового зв'язку з використанням систем НAPS в основному націлені на райони з низькою щільністю користувачів та обмежується сільськими та віддаленими районами, щоб забезпечити широкопasmовий доступ як альтернативу наземним системам та для ліквідації наслідків стихійних лих. Однак послуги зв'язку в міських та приміських

районах значною мірою зосереджені зі зростаючим попитом. Архітектура безпроводового доступу на основі HAPS, яку ми передбачаємо, представляє переконливу альтернативу згущенню наземної мережі завдяки можливості використання однієї платформи для кількох додатків, як детально описано нижче. Таблиця 3.2 підсумовує особливості передбачуваних нами систем HAPS порівняно зі звичайними системами HAPS.

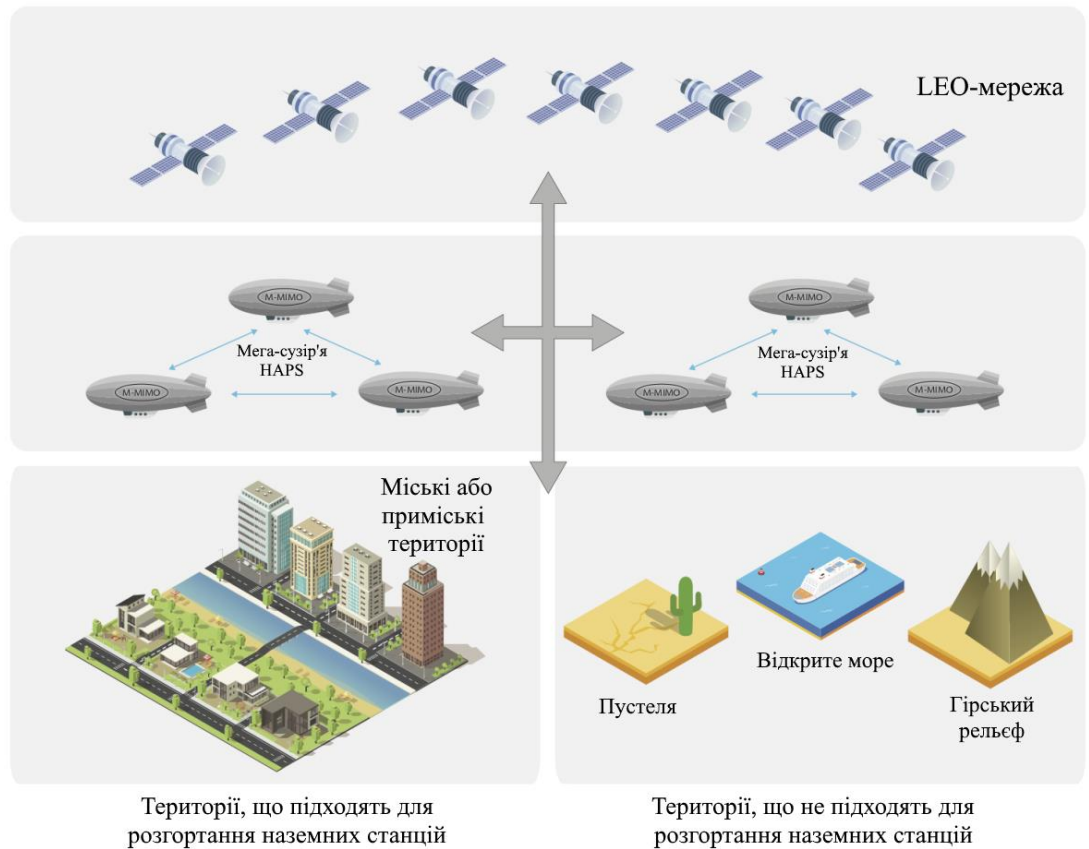


Рис. 3.2. Бачення мега-угруповань HAPS, що об'єднують космічні та наземні мережі в густонаселених міських центрах, забезпечуючи підключення та обчислення навіть на місцевості, яка не підходить для архітектур наземних мереж, протягом наступних 20 років

Таблиця 3.1

Додаткові особливості систем HAPS порівняно з низькоорбітальним (LEO) супутником

Перевага	Опис
Розгортання на малій висоті з сприятливими умовами для каналу	<ul style="list-style-type: none"> <li>Очікується, що розгортання сузір'їв HAPS буде на нижчій висоті порівняно із супутниками LEO, розташованими від 350 км до 2000 км, що призведе до сприятливого бюджету каналу та високого співвідношення сигнал/шум (SNR) для низхідної лінії зв'язку, що забезпечує перевагу покриття. Відносно висхідної лінії зв'язку, відносно низькі втрати на шляху дають змогу використовувати UE-термінали, які мають обмежені рівні потужності передачі, без потреби в спеціалізованих наземних станціях.</li> </ul>
Майже стаціонарне розташування	<ul style="list-style-type: none"> <li>Супутники LEO можуть перетинати континенти протягом декількох хвилин через їх високу швидкість. Як наслідок, частина потужностей супутникового зв'язку LEO втрачається, коли вони проходять над океанами та малонаселеними районами. Навпаки, відносно стаціонарне положення систем HAPS запобігає втратам потужності.</li> <li>Стаціонарне положення каналів дозволяє уникнути значного доплерівського зсуву.</li> </ul>
Менша площа при більшій поверхні	<ul style="list-style-type: none"> <li>Система HAPS має меншу площу в порівнянні з LEO, що забезпечує більшу пропускну здатність області. Завдяки своєму великому об'єму HAPS підходить для розгортань MIMO та масового MIMO. За допомогою багатоантенних решіток системи HAPS можуть генерувати високонправлені тривимірні промені вузької ширини, що покращує SINR для всіх користувачів.</li> <li>Більший обсяг систем HAPS може бути обладнаний величезними сонячними панелями та системами накопичення енергії. Завдяки прогресу в ефективності сонячних панелей та накопиченню енергії системи HAPS можуть тривалий час перебувати в повітрі з мінімальним споживанням енергії.</li> </ul>

## Продовження таблиці 3.1

## Додаткові особливості систем HAPS порівняно з низькоорбітальним (LEO) супутником

<b>Перевага</b>	<b>Опис</b>
Зменшена затримка в обидві сторони	<ul style="list-style-type: none"> <li>Через меншу висоту система HAPS відповідає затримці в обидва боки від 0,13 до 0,33 мс, що робить їх хорошим варіантом для програм із низькою затримкою, таких як URLLC. Отже, система зв'язку на основі сузір'я HAPS може подолати притаманну супутниковим мережам проблему високої затримки.</li> </ul>
Переваги розгортання та обслуговування	<ul style="list-style-type: none"> <li>Витрати та ризики розгортання нижчі у випадку систем HAPS порівняно з LEO. Більш того, системи HAPS легше повернути на землю, коли вони закінчать свою місію, тоді як супутники неможливо відновити.</li> </ul>

Таблиця 3.2

## Особливості передбачених систем HAPS у порівнянні зі звичайними HAPS

<b>Аспект порівняння</b>	<b>Прийнята HAPS</b>	<b>Передбачувана HAPS</b>
Сценарії застосування	Сільські та віддалені райони, надзвичайні ситуації.	Міські та приміські території на додаток до віддалених районів.
Густота населення	Застосовується лише в регіонах із низькою щільністю користувачів.	Підходить для районів з високою щільністю користувачів.
Цілі	Розширення покриття наземної мережі.	Максимізація досяжної потужності для охоплення великої кількості користувачів. Гарантування низької затримки для критично важливих додатків.



## Продовження таблиці 3.2

Особливості передбачених систем HAPS у порівнянні зі звичайними  
HAPS

Аспект порівняння	Прийнята HAPS	Передбачувана HAPS
Функції	Забезпечення підключення для наземних користувачів.	На додаток до підключення, підтримує обчислення, керування та кешування. З'єднання БПЛА та вузлів супутникових мега-угруповань.
Цільові варіанти використання	Широкопasmовe покриття, доступ до Інтернету, відновлення після стихійного лиха та моніторинг навколишнього середовища.	Додатки Інтернету речей (IoT), розумні транспортні системи, вантажні безпілотники з важливим вантажем, додатки доповненої (AR)/віртуальної (VR) реальності великої ємності, непередбачувані тимчасові події, розвантаження обчислень та заповнення прогалів у покритті.
Співіснування	Як альтернатива наземним мережам.	Як доповнення до наземних і супутникових мереж.
Тип мережі	Пов'язана з технологіями 3G/4G.	Пов'язана з епохою 5G і далі.
Розгортання	Одна ізольована HAPS для забезпечення покриття та потужності.	Кілька систем HAPS утворюють мережу для забезпечення покриття та пропускної здатності.

### 3.2.1 Макро базова станція, змонтована на HAPS (HAPS-SMBS)

Макро BS є важливим компонентом архітектури безпроводового доступу для забезпечення покриття та підтримки. В даний час концепція ущільнення мережі за допомогою розгортання малих стільників широко визнана у стандартах 4G, довгострокової еволюції (LTE) та 5G для задоволення вимог покриття та ємності в наземних мережах. Однак потреби в комунікаціях у столичних районах постійно зростають, і розгортання невеликих стільникових операторів не в змозі задовольнити цей постійно зростаючий попит. Незважаючи на те, що покриття та ємність мережі можна покращити за рахунок додавання BS на встановлених БПЛА, їх обмеження щодо розміру, ваги та потужності (Size, Weight, and Power – SWAP) обмежують термін служби та зону покриття BS на БПЛА. Крім того, мобільність таких БПЛА вводить обмеження швидкого включення/вимкнення, коли BS потрібно активувати/деактивувати дуже швидко.

У порівнянні з БПЛА, системи HAPS, які за своєю суттю є квазістаціонарними, мають більшу площу, більшу обчислювальну потужність і кращі LOS-канали зв'язку. Таким чином, SMBS, змонтована на HAPS (HAPS-SMBS), можна розглядати як потужну платформу для покращення підключення. Системи HAPS-SMBS, однак, не є альтернативою наземним BS; натомість вони є додатковим рішенням для управління та контролю мережі. Використання систем HAPS-SMBS для підтримки наземної мережі зв'язку забезпечує гнучкість і дає можливість швидкого підвищення пропускну здатності інтелектуальним способом для задоволення високих і змінних вимог трафіку. Завдяки такій спритності в дизайні мережі середні вимоги користувачів можуть бути задоволені наземною мережею, а швидкозмінювані або непередбачувані вимоги користувачів можуть бути задоволені за допомогою додаткової системи HAPS-SMBS. Через більший обсяг застосування масових методів в HAPS-SMBS

може бути використано МІМО для забезпечення покращеної ємності каналу. Крім того, використання кількох скоординованих систем HAPS-SMBS, оснащених кількома антенними решітками, може забезпечити додаткову гнучкість надзвичайно точних променів за допомогою розподіленої установки МІМО. Скоординоване використання декількох систем HAPS-SMBS також передбачається для столичних районів. Слід додати, що, на відміну від звичайних макро-BS, системи HAPS-SMBS не лише розширюють охоплення та потужність, але й служать обчислювальними платформами. Вони функціонують як інтелектуальні фреймворки, які забезпечують зв'язок, обчислення та кешування, використовуючи при цьому потужність алгоритмів машинного навчання. Завдяки цим функціям потенційні переваги HAPS-SMBS можуть бути значно більшими, ніж звичайні макро-BS. Ми передбачаємо, що майбутні архітектури HAPS-SMBS підтримуватимуть збір даних, обчислення, кешування та обробку в різних доменах додатків, як показано на рис. 3 та детально описано нижче. Однак загальні вимоги цих потенційних варіантів використання до доступу до доцільності розгортання ще не обговорювалися. У цій статті ми обговорюємо вимоги до дизайну та технічного аналізу для досягнення цих випадків використання з метою розкриття їх повного потенціалу.

### **3.2.2 Варіанти використання систем HAPS-SMBS**

1) Системи HAPS-SMBS для підтримки послуг IoT: очікується, що HAPS відіграватиме ключову роль у підтримці різноманітних додатків Інтернету речей (IoT). Постійно зростаюче поширення технологій IoT ставить перед дослідницькою спільнотою суттєві проблеми з точки зору вирішення вимог щодо підключення, надійності та затримки величезної кількості підключених пристроїв. У цьому контексті існуючі інфраструктури та методи розробки архітектури безпроводового доступу досить обмежені та не здатні підтримувати

ці дуже вимогливі безпроводові системи та послуги. Широке поширення систем HAPS ідеально підходить для забезпечення більшого покриття великої кількості пристроїв IoT, кожен з яких має низькі швидкості з'єднання. Крім того, пристрої IoT можуть бути розташовані в районах, де немає покриття наземної мережі (наприклад, ліси, гори, океани тощо). Таким чином, системи HAPS-SMBS є привабливим рішенням для доповнення наземних мереж для збору даних з пристроїв Інтернету речей і забезпечення надійного висхідного зв'язку для них безперебійним, ефективним і економічно вигідним способом, як показано на рис. 3.3 (а).

Для підтримки пристроїв IoT на землі від HAPS-SMBS, закономірним виникне питання про необхідну потужність передачі таких пристроїв IoT для безпосереднього зв'язку з HAPS-SMBS, розташованим на відстані принаймні 20 км. Це стає ще більш акцентованим для деяких конкретних додатків із пристроями IoT, які, як очікується, працюватимуть протягом десятиліть без необхідності перезаряджати або замінювати батареї. Серед іншого, необхідна потужність передачі пристроїв пропорційна необхідному прийнятому SNR для гарантування якості обслуговування, яка обернено пропорційна швидкості передачі. Пристрої IoT передають дані з дуже низькою швидкістю передачі даних, коли вони увімкнені (зауважте, що пристрої можуть періодично включатися та вимикатись протягом тривалого періоду часу), тому пристрої IoT з низькою швидкістю передачі даних можуть спілкуватися безпосередньо з HAPS, використовуючи низьку потужність передачі.

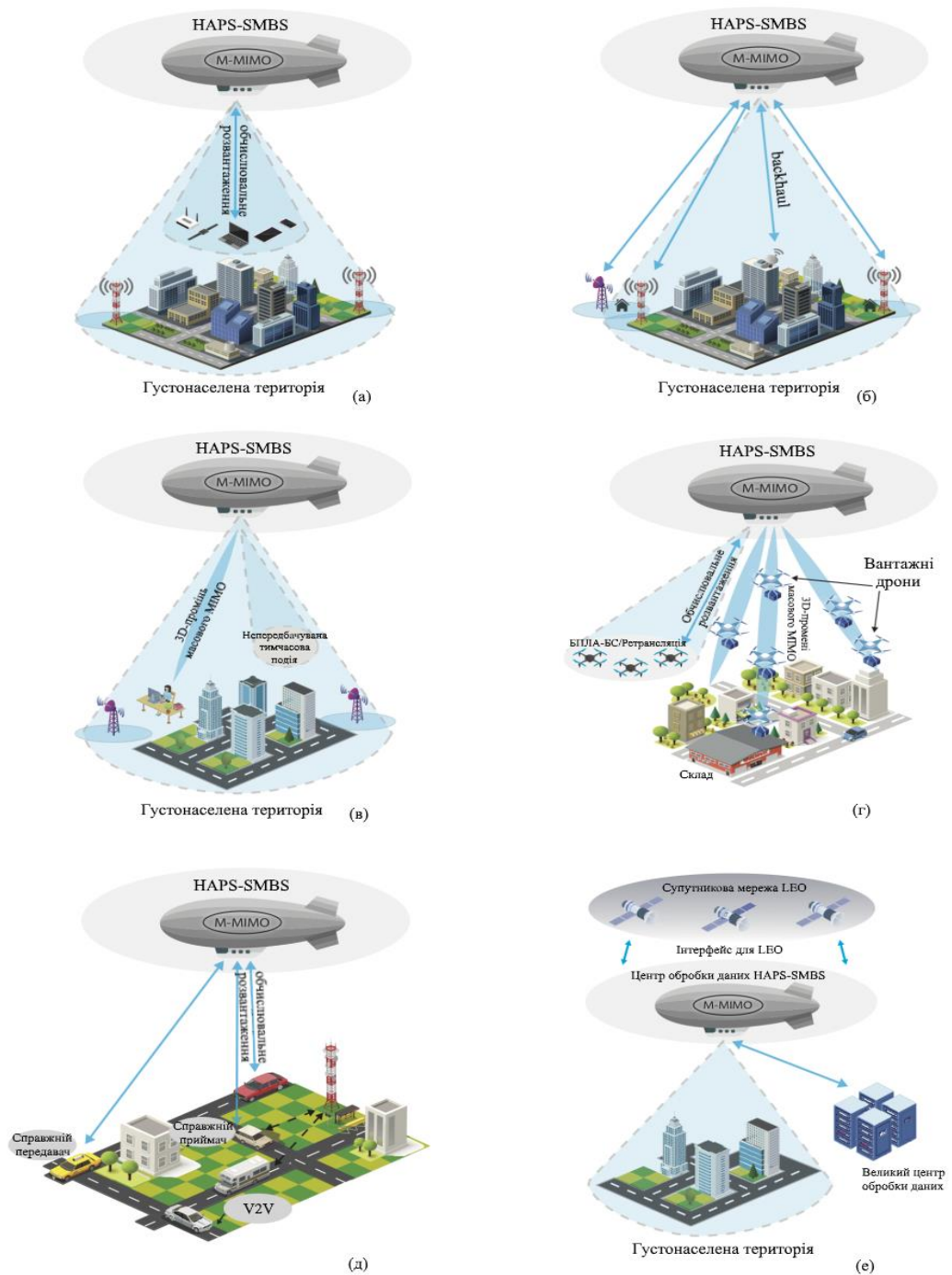


Рис. 3.3. (а) HAPS-SMBS, що надає послуги IoT. (б) HAPS-SMBS, що підтримує невеликі та ізольовані BS. (в) HAPS-SMBS, що охоплює незаплановані події та заповнює прогалини в охопленні. (г) HAPS-SMBS, що підтримує і керує повітряними мережами. (д) HAPS-SMBS, що підтримує інтелектуальні транспортні системи. (е) HAPS-SMBS, що діє як інтерфейс між супутниками LEO та як аероцентр даних

Замість того, щоб обробляти масовий зв'язок машинного типу (mMTC), який ми маємо в наземних мережах, нам потрібно обробляти  $m$ x-MTC ( $x \gg 1$ ) у випадку HAPS-SMBS через його велику зону покриття. Це створить багато безпрецедентних проблем через необхідність розробити ефективні методи множинного доступу для одночасної передачі величезної кількості пристроїв. Розробникам систем також може знадобитися знайти баланс між зменшенням колізій пакетів, які зменшують потребу в частих спробах повторної передачі пакетів (з огляду на дуже суворе обмеження споживання енергії деякими пристроями та/або суворі вимоги щодо затримки деяких програм) і вимогами до надійності критично важливих програм, які можуть вимагати повторної передачі пакетів.

2) Системи HAPS-SMBS для ретрансляції малих та ізольованих BS: Хоча волоконно-оптичні комунікації залишаються найкращим варіантом для транспортного backhaul-зв'язку, установка волокна в якості транспортного каналу для малостільникових BS може бути не самим ефективним рішенням для багатьох середовищ через його високу вартість. Економічним рішенням для транспортного зв'язку є використання безпроводових мікрохвильових каналів, і це вже досить широко прийнятий підхід. Крім того, комбінація ширшої смуги пропускання каналу в діапазонах MMX і цифрового формування променя МІМО з удосконаленими антенами з високим коефіцієнтом посилення робить MMX життєздатним рішенням для внутрішньосмугового транспортного зв'язку.

Хоча відстань між HAPS і наземною фемто-BS може бути від 20 км до 200 км (залежно від зони покриття HAPS), канал зв'язку є майже домінуючим LOS (з показником втрати шляху близько 2) з помірним затіненням/затухаючі коливання через відсутність розсіювання. Таким чином, практичний розрахунок передбачає, що мала BS з тривимірною відстанню 200 км від HAPS може отримати майже такий самий середній приріст потужності, який вона отримує

від макро-BS, але на відстані 1000 метрів. Оскільки наше бачення підтримує використання систем HAPS для міст, промислових районів і навіть мегаполісів, площа покриття HAPS може становити всього 20-50 км. Однак ці показники стають більш перспективними для фемтостільників, розташованих на відстані 50 км від HAPS, при отриманні середньої потужності сигналу, подібної до потужності макро-BS на відстані близько 100 метрів. Крім того, ми повинні зазначити, що, оскільки фемто-BS є стаціонарними, а системи HAPS квазістаціонарними, встановлення та обслуговування таких каналів є менш вимогливими, оскільки відстеження та регулювання променя менш необхідні. В результаті, додаткова затримка зв'язку, спричинена великими відстанями між системами HAPS і фемто-BS, може бути компенсована випадковими подіями регулювання/встановлення променя (порівняно з наземними мережами).

У порівнянні з наземними комунікаціями, ММХ-канали зв'язку від HAPS до наземних фемто-BS можуть зазнати втрат із-за дощу/хмар (пропорційно  $10 cr/H$ , де  $H$  – висота HAPS,  $r$  – відстань між землею та HAPS, а  $c$  (дБ/км) – коефіцієнт, що поглинає ефект дощу/хмар). Ця додаткова втрата може не бути проблемою, враховуючи, що HAPS може компенсувати ці негативні ефекти шляхом виділення більшої потужності передачі та використання більшого посилення спрямованої антени через можливість встановлення дуже великих 3D антенних решіток. Крім того, як ми також згадували раніше, канал не схильний до серйозних коливань затінення/загасання, що може підвищити середню потужність прийому приблизно на 10-20 дБ порівняно з аналогічними каналами наземного зв'язку.

З іншого боку, де-факто рішеннями є ММХ або макрохвилі зв'язку від макро-BS. Макрохвильові комунікації є універсальними і, таким чином, є першим варіантом. Однак вони страждає від високого ослаблення сигналу, враховуючи те, що макро-BS на даний момент нахилені вниз, і той факт, що міжстільникові перешкоди є досить домінуючими. Тому, якщо це можливо,

ММХ-зв'язок у поєднанні з масивними МІМО-комунікаціями слід розглядати для управління міжклітинними перешкодами. Зауважте, що для забезпечення якості ММХ-зв'язку завдяки маневреності БПЛА-BS, макро-BS має завжди залишатися в області перегляду зв'язку БПЛА-BS. Така вимога, однак, може обмежувати та ускладнювати управління мобільністю БПЛА-BS, оскільки замість оптимізації мобільності БПЛА-BS лише для найкращої продуктивності для наземних користувачів або наданої послуги (найкоротший шлях для доставки пакетів), необхідно врахувати вимоги до зв'язку в мережі. З іншого боку, через зворотну передачу від HAPS такі проблеми є в основному тривіальними, оскільки управління мобільністю може стати лише питанням якості послуг, які надає БПЛА-BS. Однак слід зазначити, що в порівнянні з backhaul для наземних фемто-BS, випадок є більш складним, оскільки потрібне постійне відстеження променя через мобільність БПЛА-BS.

В зв'язку з останніми досягненнями в системах HAPS і FSO, зовнішні малостільникові BS можуть використовувати backhaul-канали HAPS-SMBS. Зауважте, що канали FSO вразливі до погодних умов. У разі похмурих, дощових та туманних умов якість каналів FSO може істотно погіршитися. Отже, оскільки канали FSO, як правило, є більш надійними за ясних погодних умов, слід досліджувати надійні рішення для ефективної боротьби з різними погодними умовами. Одним із простих рішень може бути підвищення надійності каналів зв'язку FSO шляхом розгляду гібридних технологій радіочастотного (RF)/FSO, як показано на рис. 3 (б). Хоча це рішення є можливим і має безпосередні переваги, слід зазначити, що оскільки ММХ-зв'язок може мати меншу спектральну ефективність порівняно з FSO, це може вплинути на швидкість передачі даних між HAPS-SMBS і наземною станцією. В результаті, крім раннього виявлення для автоматичного перемикання між технологіями, може знадобитися складне розподілення ресурсів і тривимірне формування променя.



3) Системи HAPS-SMBS для покриття незапланованих користувацьких подій: у разі несподіваних і тимчасових подій, які важко передбачити, таких як виникнення випадкового натовпу, безпроводові мережі можуть потребувати додаткової підтримки для повсюдного підключення. Такі події зазвичай трапляються у великих містах і можуть призвести до перевантаження мережі. Нещодавно BS, встановлені на БПЛА, привернули велику увагу із-за збільшення безпроводової пропускної здатності та розвантаження трафіку з перевантажених наземних BS під час таких подій. Порівняно з повітряними BS, встановлених на БПЛА, які мають обмеження SWAP, системи HAPS-SMBS забезпечують більшу пропускну здатність для наземних користувачів завдяки своїм великим платформам, потужним можливостям MIMO та вищій потужності передачі. Отже, передбачувана архітектура HAPS-SMBS може задовольнити запити непередбачуваних подій шляхом збільшення відповідності між розподілами попиту та пропозиції, як показано на рис. 3 (в).

Щоб охопити такі тимчасові незаплановані користувацькі події, системи HAPS-SMBS можуть бути використані опортуністично. Крім того, ці події можна також охопити через надмірно спроектовані наземні мережі. У цьому випадку витрати на роботу HAPS-SMBS можна порівняти з витратами на проектування наземної мережі. Незважаючи на прибутки, забезпечення зв'язку з цими сценаріями важливо, щоб уникнути серйозних втрат і створює складні вимоги, такі як висока швидкість передачі даних. Тим не менш, оскільки масова MIMO є однією з найбільш руйнівних технологій для підвищення пропускної здатності наземних мереж, перспективність цієї технології в системах HAPS-SMBS необхідно дослідити. Також необхідно переглянути інші методи підвищення ємності, такі як NOMA, MMX, beamforming та будь-яку їх комбінацію в сценарії HAPS. Загалом, для прогнозування виникнення тимчасових подій (разом з деякими оцінками щодо обсягу виробленого трафіку на географічну територію та одиницю часу) потрібні передові рішення для

великих даних, щоб належним чином забезпечити ресурси, включаючи пропускну здатність, потужність та обчислювальну здатність.

4) Системи HAPS-SMBS як повітряні центри обробки даних: системи HAPS-SMBS також зможуть працювати як повітряні центри обробки даних для підтримки гнучкого обчислювального розвантаження. Наприклад, програми доповненої реальності (Augmented Reality – AR) можуть вимагати високих обчислювальних можливостей. У зв'язку з цим ефективно обчислювальне розвантаження буде необхідністю. Оскільки системи HAPS-SMBS можуть мати більшу обчислювальну потужність, ніж термінали користувача (наприклад, БПЛА-вузли або наземні користувачі), можуть бути корисними для надання різних рівнів обчислювальних послуг. Крім того, завдяки своєму високому розташуванню HAPS-SMBS може забезпечити краще покриття LOS-каналами, уникаючи можливості відключення під час розвантаження даних. Будучи повітряними центрами обробки даних, системи HAPS-SMBS також можуть надавати резервні обчислювальні засоби.

Для реалізації літаючого центру обробки даних, системи HAPS-SMBS повинні мати достатньо енергії від сонячних панелей для підтримки додаткових обчислень. Це вимагає дослідження того, скільки енергії знадобиться HAPS-SMBS для підтримки додаткових обчислень і скільки сонячної енергії можна зібрати. Також охолодження є важливою вимогою центрів обробки даних. Атмосферна температура на робочій висоті HAPS є досить низькою (в середньому в діапазоні  $[-15^{\circ}\text{C}, -50^{\circ}\text{C}]$ ), тому нам може не знадобитися занадто багато енергії для охолодження, оскільки ми можемо використовувати природно низьку температуру навколо HAPS. Крім того, розмір дата-центру HAPS-SMBS буде обмежений ємністю бортового навантаження. Більш того, одним із важливих питань проектування в центрах обробки даних є зменшення затримок реагування. Аналіз даних у небі зменшить затримки відповіді та зменшить навантаження на лінії зв'язку «повітря-земля».

5) Системи HAPS-SMBS для заповнення прогалин покриття: системи HAPS-SMBS можуть доповнювати існуючі наземні мережі, заповнюючи прогалини в покритті рентабельним способом. Прогалини в покритті виникають, коли наземні UE стикаються з недостатнім співвідношенням сигнал/перешкода плюс шум (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio – SINR) від наземної BS через фізичні перешкоди. Такі ефекти блокування стають більш серйозними для стільникових мереж в ММХ-діапазоні і можуть мати більший негативний вплив на групи користувачів.

Щоб вирішити цю проблему, HAPS-SMBS вимагає направляти промінь у цільовому напрямку. У порівнянні з БПЛА, перевагою використання систем HAPS-SMBS є їх великий розмір платформи та можливість виконувати тривимірне формування променів з масовим МІМО, що дозволяє створювати розрізнені вузькі промені для кожного користувача в тривимірному просторі. Крім того, система HAPS-SMBS може надавати постійне обслуговування, а не тимчасове обслуговування БПЛА. Цей варіант використання також показаний на рис. 3 (в). Тим не менш, для систем HAPS-SMBS до UE слід дослідити створення дуже вузьких променів з більшою потужністю та точними напрямками керування променями. Це може бути проблематичним, головним чином, через великі відстані між користувачами та системами HAPS-SMBS, оскільки оцінка/зворотний зв'язок CSI може призвести до неприйнятної затримки і, отже, застарілого beamforming-рішення. Як наслідок, beamforming та розподіл ресурсів повинні бути менш чутливими до точного/сучасного знання каналу. По суті, потрібно розробити рішення, які більше покладаються на довгострокову поведінку каналу, наприклад, статистичний CSI.

6) Системи HAPS-SMBS для підтримки та управління повітряними мережами: Покращення обчислювальних можливостей БПЛА стає все більш важливим для підтримки критичних завдань на БПЛА. Однак через обмеження SWAP БПЛА мають обмежені бортові обчислювальні ресурси. Система HAPS-

SMBS може бути оснащена потужними процесорами, які можуть підвищити обчислювальну потужність елементів з обмеженими ресурсами БПЛА-мереж в якості доповнення до наземних мереж. Більша зона покриття однієї HAPS-SMBS дозволяє збирати дані з великих секторів повітряної мережі, що зменшує залежність від наземних станцій, які вже переповнені в більшості міських районів. Більше того, ефект перешкод буде набагато вищим у наземних базових станціях порівняно з системами HAPS-SMBS для такого обчислювального розвантаження для БПЛА. Крім того, використовуючи алгоритми машинного навчання (Machine Learning – ML), HAPS-SMBS може інтелектуально керувати мережею БПЛА з мінімальною залежністю від наземного керування, як показано на рис. 3 (г).

Для управління мережами БПЛА системами HAPS-SMBS буде гарантовано безперебійне з'єднання вузлів БПЛА з системами HAPS-SMBS. Системи HAPS-SMBS повинні гарантувати надійне та широке підключення з відносно низькою затримкою. Крім того, очікується, що найближчим часом тисячі вантажних БПЛА будуть літати у густонаселених міських районах щодня. Щоб забезпечити їхню безпечну роботу, необхідно постійно збирати та аналізувати величезну кількість даних про них. Для цього знадобляться вбудовані процесори з достатньою потужністю та підтримкою охолодження.

7) Системи HAPS-SMBS для підтримки інтелектуальних транспортних систем: повномасштабне впровадження парадигми розумних транспортних систем (Intelligent Transportation System – ITS)/з'єднаних автономних транспортних засобів (Connected Autonomous Vehicle – CAV) стане найбільшою автомобільною революцією в історії. Нещодавні досягнення в області датчиків, високоякісних обчислювальних блоків та впровадження можливостей безпроводового зв'язку в автомобілях проклали шлях для CAV, що дозволить створити безпрецедентні сценарії для автомобільного транспорту. В даний час автовиробники витрачають мільярди доларів на пропаганду ідеї, що автомобілі

CAV можуть значно знизити рівень дорожньо-транспортних пригод та створити більш безпечне суспільство. Однак такі прориви, безумовно, створять нові виклики для проектування та впровадження інфраструктури CAV. Наприклад, CAV повинні підтримувати такі послуги, як взаємодія з водіями, співпраця з іншими транспортними засобами, пропонувати підтримку в прийнятті рішень та стратегії контролю та управління дорожнім рухом. Крім того, CAV повинні розпізнавати своє оточення, планувати маршрут і контролювати рух транспортних засобів без участі людини. Але для таких додатків CAV необхідні широкомасштабне злиття та обробка даних. Цікаво, що HAPS-SMBS може відігравати ключову роль у забезпеченні повсюдного покриття для цієї парадигми ITS/CAV. Оскільки транспортні засоби можуть бути обмежені у своїх можливостях обчислювальної обробки, їм може знадобитися вивантаження даних. Завдяки великій зоні покриття та значним обчислювальним можливостям HAPS-SMBS можна використовувати для розвантаження даних з мінімальними затримками зв'язку. Крім того, системи HAPS-SMBS можуть забезпечувати покриття в сільських і віддалених районах, що важливо для пересування по автомагістралям і використання поїздів, авіарейсів або кораблів (рис. 3 (д)).

Для підтримки таких операцій інформацію з вузлів датчиків транспортного засобу потрібно буде пересилати до HAPS-SMBS, яка потім або буде діяти як ретранслятор, пересилаючи отриманий сигнал на наземний шлюз, або оброблятиме отримані дані на борту та надсилатиме їх назад до транспортних засобів з подальшими інструкціями. Цей вибір вимагає оптимального планування в розподілі розвантаження даних і обчислювальних послуг у наземних мережах і мережах HAPS з урахуванням затримок як зв'язку, так і обчислень. Деякі інші проблеми проектування цієї системи полягали б у підтримці високих рівнів QoS (затримка, помилка пакету, ймовірність відключення) для телекомунікаційних каналів між транспортним засобом і

HAPS-SMBS, щоб забезпечити надійний і швидкий обмін повідомленнями та гарантувати додатки для транспортування та безпеки..

Системи HAPS-SMBS також можуть забезпечити покриття вантажних безпілотників, які, ймовірно, порушать роботу роздрібною торгівлі найближчим часом. Зазвичай вантажні дрони підтримуються через наземні мережі. В даний час мегакорпорації рекламують використання вантажних безпілотників для доставки кур'єрських пакетів. Наприклад, вантажні дрони можуть використовуватися для основної служби доставки Amazon та автономної доставки ліків для невідкладної допомоги. У цьому сценарії велика кількість вантажних безпілотників буде постійно летіти і заповнювати небо, а отже, слід очікувати 3D-шосе для підтримки доставки вантажних пакетів за допомогою цих дронів. Один HAPS-SMBS можна використовувати для покриття великої кількості вантажних дронів у великих містах.

У цьому випадку системи HAPS-SMBS повинні забезпечувати надійне з'єднання та безпечну роботу вантажних безпілотників у повітряному просторі, ймовірно, включаючи поєднання рішень, базованих на радіо та видимості. Це вимагає забезпечення каналів зв'язку високої надійності та низької затримки для багатьох вантажних дронів у великих географічних районах. Крім того, оскільки системи HAPS-SMBS можуть забезпечити обчислювальну платформу для планування шляху та навігації відповідно до вимог ланцюга поставок, потрібні складні рішення для масового розвантаження обчислень..

8) Системи HAPS-SMBS для обробки передачі обслуговування супутників LEO та забезпечення безперебійного підключення: високі швидкості супутників LEO вимагають часті передачі обслуговування на наземних шлюзах, що небажано. На щастя, системи HAPS-SMBS можуть охоплювати багато супутників одночасно завдяки своїй великій площі покриття. Таким чином, щоб забезпечити безперебійне LEO-супутникове підключення до повітряних і наземних мереж, система HAPS-SMBS може слугувати інтерфейсом для

керування передачі обслуговування в супутниковій мережі LEO, як показано на рис. 3 (e). У цьому сценарії часті передачі обслуговування супутників LEO будуть оброблятися системами HAPS-SMBS. Крім того, якщо наземні користувачі можуть зв'язуватися з інтерфейсом HAPS-SMBS безпосередньо, то для користувачів немає необхідності встановлювати спеціальні пристрої для зв'язку із LEO-супутниками.

У цій системі є два типи посилянь: посилення користувача на HAPS; і супутникові лінії HAPS-LEO. Зв'язок між користувачем і HAPS-SMBS може бути реалізований через радіочастотні канали, тоді як канали FSO були б кращим вибором для з'єднань HAPS до LEO. Досягнє покращення продуктивності вищезгаданої архітектури може бути реалізовано за допомогою аналізу бюджету каналу. Покращення бюджету каналу можна досягнути, зменшивши потужність передачі, а також вартість і розмір терміналу користувача. Однак, щоб встановити надійні та безперебійні з'єднання між наземними/повітряними користувачами та супутниками LEO через системи HAPS-SMBS, системам HAPS-SMBS необхідно вивчити моделі мобільності супутників LEO, щоб передбачити їх передачу, а потім встановити з'єднання з наступним супутником до втрати поточного з'єднання. У зв'язку з цим підходи машинного навчання відіграватимуть значну роль у вивченні цих моделей мобільності. Слід також зазначити, що з додаванням нових супутникових сузір'їв до сучасних систем супутникового зв'язку рішення ML повинні бути достатньо гнучкими, щоб впоратися з постійними змінами навколишнього середовища. В якості альтернативного рішення, можна також вимагати включення системи/даних супутникового відстеження (зібрання та обробки для передбачення будь-яких можливих зіткнень між супутниками) в моделі, щоб компенсувати відносно раптові зміни орбітальних рухів деяких супутників.

## 4 ІНТЕГРОВАНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ НАЗЕМНИХ ТА СУПУТНИКОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ FSO

### 4.1 Багаторівнева система зв'язку між наземним і не наземними сегментами

Ідеї створення багаторівневих систем зв'язку між наземним і не наземними сегментами з'явилися завдяки технічному прогресу в області створення повітряних і космічних мініатюрних супутникових платформ, що можуть працювати аналогічно наземним базових станцій. До неназемних платформ відносять наступні системи (рис. 4.1):

- Космічні супутники зв'язку, що за висотою орбіти поділяються на низькоорбітальні LEO, середньовисотні (MEO) та геостаціонарні (GEO).
- Стратосферні платформи (High Altitude Platform – HAP), розташовані на висоті 18-25 км (за особливістю атмосфери на цих висотах майже постійна температура та відсутні вітри). Можуть покривати відстані сотні кілометрів, працювати протягом тривалого часу, але вони також можуть повернутися на землю для реконфігурації. Затримка поширення сигналу 50-85 с значно нижче в порівнянні з GEO (120 мс), MEO (15-85 мс) і навіть LEO (1,5-3 мс). Стратосферні платформи можуть містити функції Mobile Edge Cloud (MEC), щоб пропонувати наземним терміналам додаткові обчислювальні можливості та можливості зберігання, тим самим розширюючи охоплення в сторону 3D.
- Низьковисотні платформи (Low Altitude Platform – LAP) або безпілотні літальні апарати (БПЛА, англ. Unmanned Aerial Vehicle – UAV), до яких відносять також як прив'язні повітряні кулі.



Прогнозується, що БПЛА стануть важливим компонентом для розгортання безпроводових мереж в найближчому майбутньому.

Оптимізації архітектури такої багаторівневої системи також сприяє перехід до програмно-конфігурованих мереж (Software Defined Networking – SDN), яка в поєднанні з секціонуванням мережі полегшує розгортання і управління мережевими функціями віртуалізації (Virtualization Network Functions – VNF) на різних фізичних платформах.

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

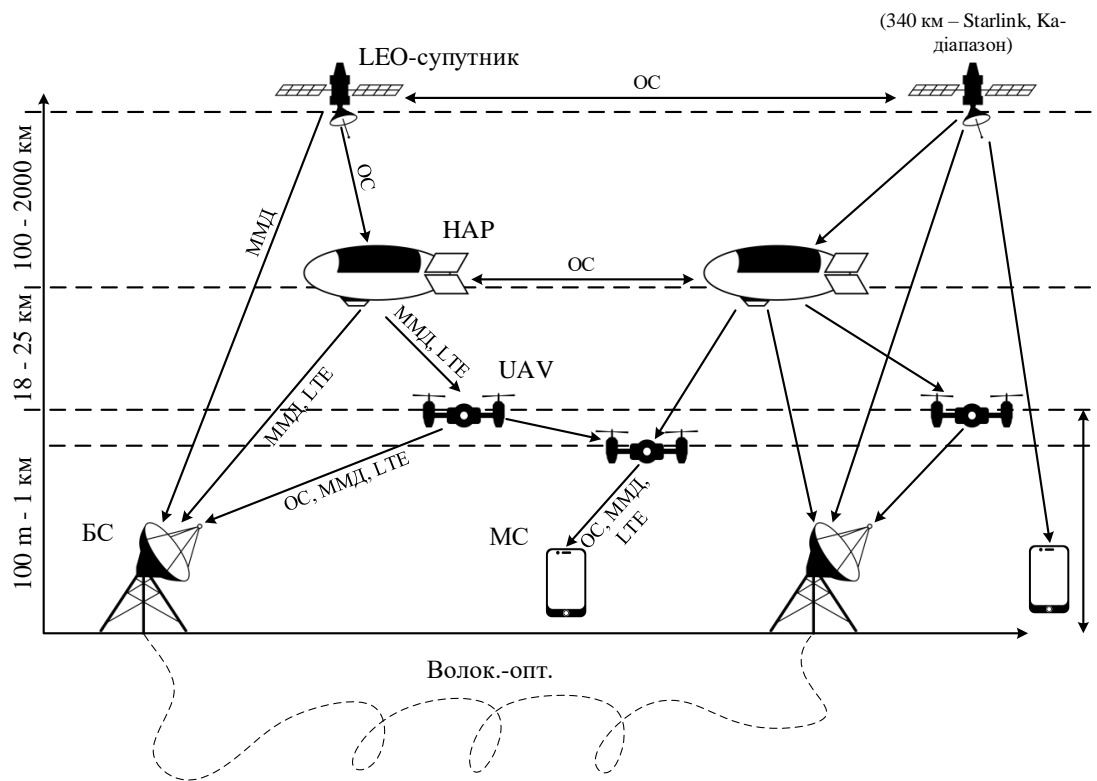


Рис. 4.1. Архітектура багаторівневого космічного зв'язку з використанням низькоорбітальних супутників, стратосферних платформ та безпілотних ретрансляторів

## 4.2 Застосування оптичного та радіочастотного спектру в багаторівневій структурі мережі

Ключовими рішенням для підвищення продуктивності безпроводових телекомунікаційних мереж може бути застосування ММД та ОД хвиль, які дозволяють організувати канали передачі з шириною в кілька гігагерц, а пропускна здатність відповідає ширині каналу. Для мобільних систем 5 G рішенням збільшення пропускної спроможності є зменшення розміру стільників і збільшення, відповідно, щільності базових станцій. Діапазон 60 ГГц, де спостерігається сильне поглинання в атмосфері, розглядається як варіант для організації мікростільників, так як природне поглинання обмежує розмір стільників і таким чином підвищує спектральну ефективність. У вікні поглинання 60 ГГц міститься до 7 ГГц частотного ресурсу для розгортання таких мереж.

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

Закономірності поширення хвиль ММД та ОД в атмосфері, в космосі, інших середовищах, в міських сценаріях ще вивчаються. Принципи моделювання каналів в міліметровому діапазоні відрізняються від моделей в інших більш низькочастотних радіодіапазонах, наприклад, 800 МГц-5 ГГц. Основними особливостями розповсюдження хвиль є слабе посилення за рахунок дифракції, поширення в області прямої видимості, поглинання в

атмосфері (рис. 2), особливо в вікнах поглинання атмосфери. В області 100 ГГц досліджуються явища перевипромінювання в атмосфері [9].

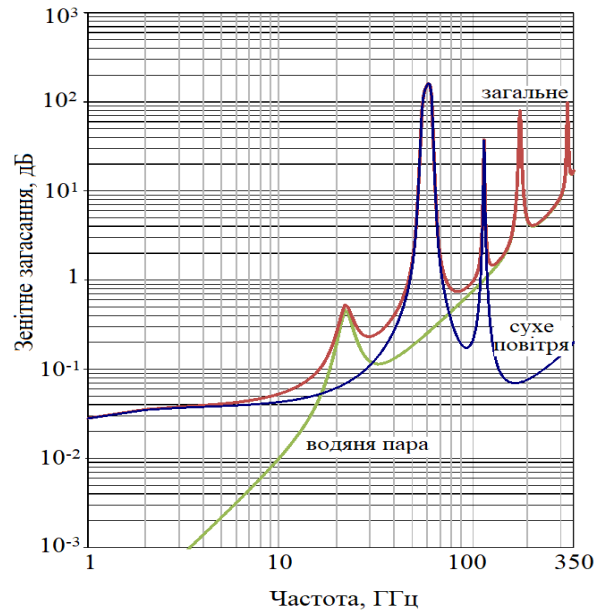


Рис. 4.2. Загальна зенітна загатка, загатка в сухому повітрі і водяній парі (тиск = 1013,25 гПа; температура = 15° С; щільність водяної пари = 7,5 г/м<sup>3</sup>)

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

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

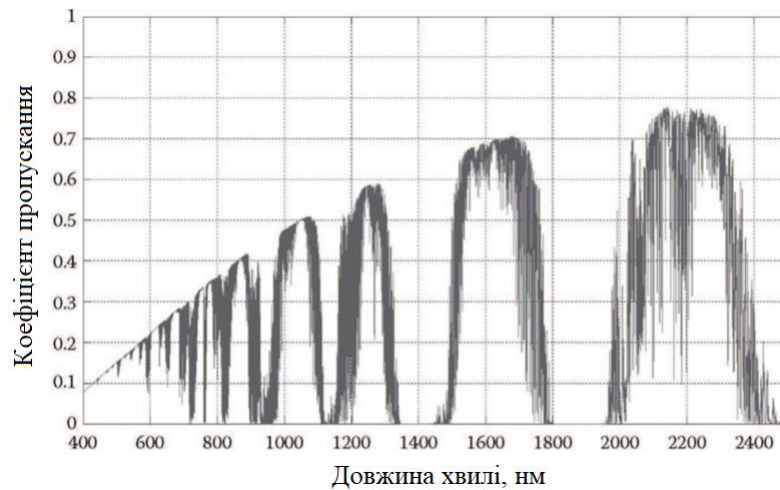


Рис. 4.3. Коефіцієнт пропускання атмосфери в залежності від довжини хвилі

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

Для високих радіочастот ММД спостерігається різні нелінійні спотворення сигналу, які пов'язані з неоднорідністю атмосфери, а в основному з нелінійними характеристиками приймально-передавального обладнання. Тому складні багаторівневі методи обробки інформаційних сигналів, що застосовуються, наприклад, у дециметровому діапазоні для підвищення пропускну здатності, не можуть бути застосовні до безпроводових систем в ММД і ОД, особливо на великих відстанях. В даний час розробляються нові форми сигналів форм сигналів і схем модуляції, кодування в ММД и ОД. Так найбільш перспективними для уникнення нелінійних спотворення сигналу розглядаються імпульсні надширокосмугові методи модуляції, просторове багатопроменеве мультиплексування, методи когнітивного спектру (SDR).

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

#### 4.3.1 Моделювання енергетичного бюджету (потенціалу) радіоканалу

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

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

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

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

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

де  $P_s/N$  позначає відношення потужності несучої до потужності шуму, необхідне для демодуляції;  $N_{TX}$  – потужність шуму джерела сигналу, яка включає в себе не тільки тепловий шум, а й інші компоненти, пов'язані з методом генерації сигналу;  $N_{RX}$  – втрати потужності сигналу в приймачі;  $N_{int}$  – Сигнал можна відновити належним чином, якщо його потужність на відстані  $d$

від передавальної антени перевищує чутливість приймача, тобто коли

$$P_{RX} - P_{RX-sens} \geq 0.$$

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

$$PL[\text{dBm}] = PL_e + PL_b + PL_g + PL_s. \quad (3)$$

де  $PL_e$  – втрати на вході в будівлю,  $PL_b$  – основні втрати на трасі,  $PL_g$  – загасання через атмосферні гази та  $PL_s$  – загасання сигналу через іоносферних або тропосферних мерехтінь.

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

$$PL_e(p) = 10 \log_{10}(10^{0.1A} + 10^{0.1B} + 10^{0.1C}), \quad (4)$$

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

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

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

В (5)  $A_{\text{зеніт}}(f_c)$  являє собою зенітне загасання (тобто загасання в точці безпосередньо над спостерігачем на Землі (рис. 4.4), яке обумовлено сухим

повітрям (киснем, індукованим тиском азотом і нерезонансним дебаєвським загасанням) і водяною парою.

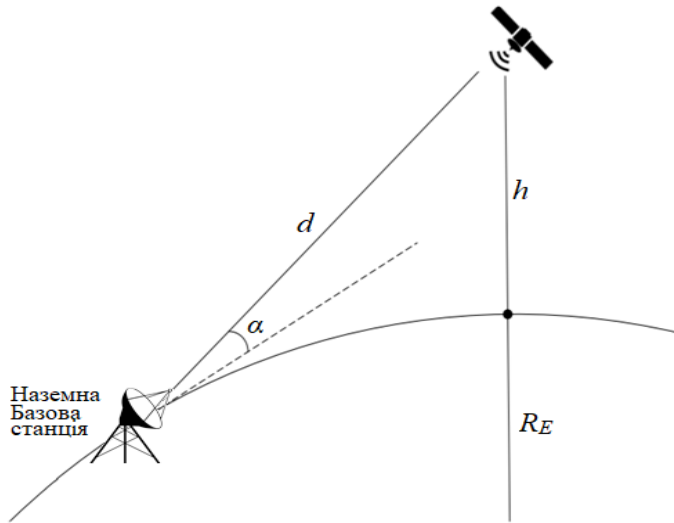


Рис. 4.4. Концепція передачі сигналу між супутником і наземною станцією ( $BS_E$ ),  $R_E$  – радіус Землі,  $h$  – висота орбіти супутника, кута елевації,  $d$  – відстань між супутником та наземною станцією

В рекомендації ITU-R P.676 [13] представлена відповідна залежність  $A_{\text{зеніт}}(f_c)$  для несучих частот від 1 до 350 ГГц (рис. 4.2), з якої видно, що в нормальних атмосферних умовах  $A_{\text{зеніт}}(f_c)$  нижче 10 дБ. На гідрометеорах загасання сигналу обчислює також різними функціями і параметрами для наземних і супутникових систем.

Слід зазначити, що для супутникових ліній зв'язку найбільший вплив на ослаблення сигналу надають найбільш нижні шари атмосфери до 2 км.

Мерехтіння відповідає швидким коливанням амплітуди і фази сигналу. Залежно від несучої частоти іоносферні і/або тропосферні мерехтіння можуть впливати на супутниковий зв'язок. Тобто явища іоносферних (тропосферних) мерехтіннь застосовні тільки для зв'язку діапазоном нижче 6 ГГц. Тому для звичайних умов на середніх широтах (от  $\pm 20^\circ$  до  $\pm 60^\circ$ ), сильні рівні мерехтіння

спостерігаються рідко, і можна прийняти, що  $PL_s = 0$ . Для всіх інших широт відповідно до [12]:

$$PL_s(f_c) = \frac{27.5 \cdot S_4^{1.26} \cdot (f_c/4)^{-1.5}}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

$S_4$  – індекс мерехтінь амплітуди [11] і залежить від широти. На низьких широтах (між  $\pm 20^\circ$ , тобто в екваторіальних областях) мерехтіння виникає через великі обсяги збідненої іонізації, створюваної конвективними плазмовими процесами, відповідно  $S_4 = 0 \div 4$ . На високих широтах (вище  $\pm 60^\circ$ ) мерехтіння в основному походить від краю зовнішнього пояса Ван-Аллена, відповідно  $S_4 = 0 \div 7$ . Вплив тропосферних мерехтінь в 3GPP характеризується як функція  $PL(f_c, \alpha)$ , на відміну від іоносферних мерехтінь, збільшується зі збільшенням частоти несучої сигналу, особливо на частотах вище 10 ГГц. У цьому випадку коливання сигналу викликані раптовими змінами показника заломлення через зміни температури, вмісту водяної пари і барометричного тиску.

Значення  $PL_b$  у формулі (3) визначають відповідно до Стандарту 3GPP TR38.901 [12], втрат у вільному просторі (Free Space Propagation Loss – FSPL), тіньового загасання (ShadowFading – SF) і втрат через перешкоди (ClutterLoss – CL), пов'язані з перевідбиттям сигналу від перешкод, і виражаються як:

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

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

$$FSPL(d, f_c) = 32.45 + 20 \log_{10}(f_c) + 20 \log_{10}(d), \quad (8)$$

Закономірності поширення радіохвиль ММД мають принципові відмінності від поширення в діапазонах, в яких працюють сучасні системи зв'язку 3G і 4G. Розсіювання сигналу ММД відбувається при відбитті від шорсткуватих бетонних поверхонь будівель, при проходженні радіохвилі ММД через крони дерев і т.д. Побудова емпіричних моделей засновано на пошуку



функції, що апроксимує вимірювання, проведені в деякій досліджуваній області. Так, еталонним підходом є використання моделі поширення Фрііса, в якій використовується емпіричне співвідношення  $D\lambda^2 = 4\pi A_{\text{eff}}$ , яке вірно для вузькосмугових систем [14].  $D_{\text{TX}}(\theta)$  – коефіцієнт спрямованої дії антени,  $\theta$  – кут розкриття антени,  $A_{\text{RX}}$  – ефективна площа приймальної антени ( $A_{\text{RX}} = KA_{\text{phys}}$ ,  $0 < K < 1$ ,  $A_{\text{phys}}$  – фізична площа антени). Із зменшенням довжини хвилі зростає спрямованість антен, так для фазованих антенних решіток кутова ширина променя відповідає  $\theta \approx \sqrt{\lambda/Nb}$  [15], де  $N$  – кількість випромінюючих елементів,  $b$  – відстань між цими елементами.

Для високочастотних радіо і оптичних бездротових систем в майбутніх проєктах було б найкращим використання однієї моделі каналу. Порівнянність параметрів посилення і втрат в каналі дуже близькі як для сигналів в ММД і в ОД. Закономірності поширення хвиль ММД мають більш квазіоптичні характеристики поширення в порівнянні з класичними діапазонами 3G і 4G.

У даній статті пропонується квазіоптичного модель, в якій враховуються втрати сигналу, пов'язані з просторовим розбіжністю сигналу:

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

де множник  $\frac{4\pi d^2}{D_{\text{TX}}(\theta)}$  визначає втрати сигналу, пов'язані з розбіжністю випромінювання (рис. 4.5).

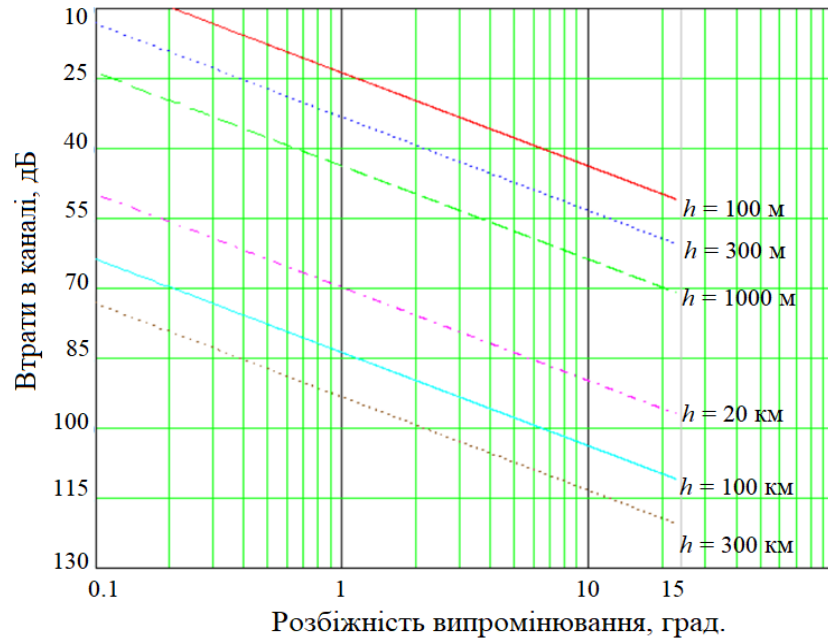


Рис. 4.5. Залежність кута розкриття антени і втрат потужності сигналу, пов'язаних з розбіжністю випромінювання для різних висот  $h$  розташування супутника

Використовуючи (3) та (9) можна отримати:

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

В (10)  $d$  виражається в метрах як функція радіуса Землі  $R_E$ , висоти орбіти супутника  $h$  і кутового розташування супутника (кута елевації)  $\alpha$  (рис. 4.4), тому:

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

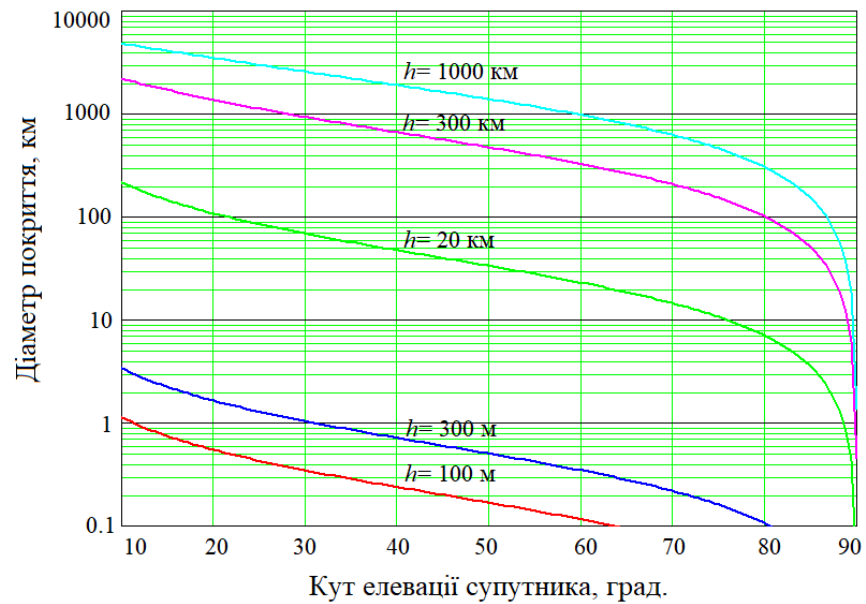


Рис. 4.6. Залежність кута елевації (місця) супутника від діаметра покриття без урахування рефракції

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

Для оцінки взаємозв'язаних величин спектральної, енергетичної ємності, пропускної спроможності зазвичай за основу береться рівняння Шеннона:

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

де співвідношення сигнал/шум  $SNR$  визначається у відповідності із (2) як  $SNR = P_{RX} / (N_{int} + N_{TX} + N_{RX})$ .

Припускаємо, що якщо співвідношення SNR нижче попередньо визначеного порога 0 дБ, то зв'язок Земля-супутник не може бути встановлена і в цьому випадку ми встановлюємо пропускну здатність Шеннона рівною 0.

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

можна збільшити за рахунок використання частотних ресурсів ММД і ОД, які також пов'язані з посиленням спрямованості ( $> 50$  дБ, що типово для сучасних супутникових антенних технологій). Розбіжність пучка світла сучасного лазера може досягати 10 мкрад. Також відомо, що для високочастотних технологій з зростанням потужності передавача зростає потужність шуму. Ця тема аналізується, наприклад в роботах [6-8], і має велику інформаційну та обчислювальну ємність. У даній роботі це питання не аналізується.

#### 4.3.2 Моделювання втрат в оптичному каналі FSO

Системи зв'язку FSO (Free-Space Optics) складаються з різних типів оптичних ліній, включаючи міжсупутникові, супутниково-атмосферні та супутниково-земні станції. Параметри для розрахунку запасу енергії лінії зв'язку системи FSO (рис. 4.4) зазвичай складаються з переданої потужності, чутливості детектора, втрат потужності в оптичній системі, геометричних втрат, пов'язаних з розбіжністю випромінювання, втрат в атмосфері (поглинання, турбулентність). Загалом, втрати в оптичному відкритому каналі можна представити як:

$$PE = PL_{atm} + PL_{geo} + PL_{sys}, \quad (9)$$

$PL_{geo}$  – геометричне загасання,  $PL_{atm}$  – атмосферне загасання, а  $PL_{sys}$  – втрати системи.

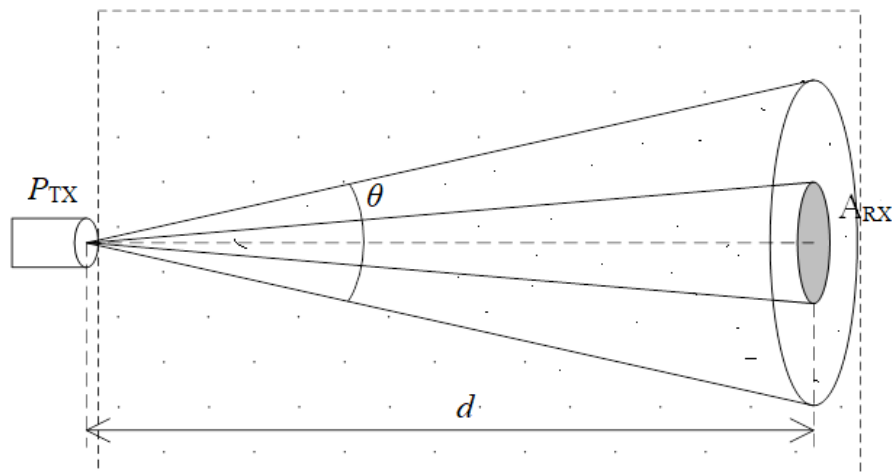
Сигнали FSO – це пил, туман, дощ, сніг, турбулентність. При цьому ефект ослаблення під час дощу менш значний, 45 дБ/км. Загасання через сніг також може досягати 150 дБ/км [17]. Туман найбільше впливає на FSO, де загасання може досягати 200 дБ/км і навіть 350 дБ/км у режимах поганої видимості [18]. Однак ослаблення в запилених каналах в умовах поганої видимості може бути навіть вищим, ніж у тумані. Лінії FSO також чутливі до зовнішнього сонячного шуму та помилок наведення. При цьому туман практично не впливає на

поширення радіочастотних сигналів ММД. Атмосферна турбулентність впливає на канали FSO виключно через розмір довжини хвилі порівняно з радіочастотними каналами. Різні статистичні моделі широко використовуються в літературі для моделювання турбулентних каналів FSO, такі як негативна експоненціальна, логнормальна та моделі Малаги [19]. Похибки вказівки зазвичай моделюються за допомогою розподілу Релея [20]. Що стосується шуму, на FSO впливає зовнішній шум від сонця, тоді як на RF впливає тепловий шум.

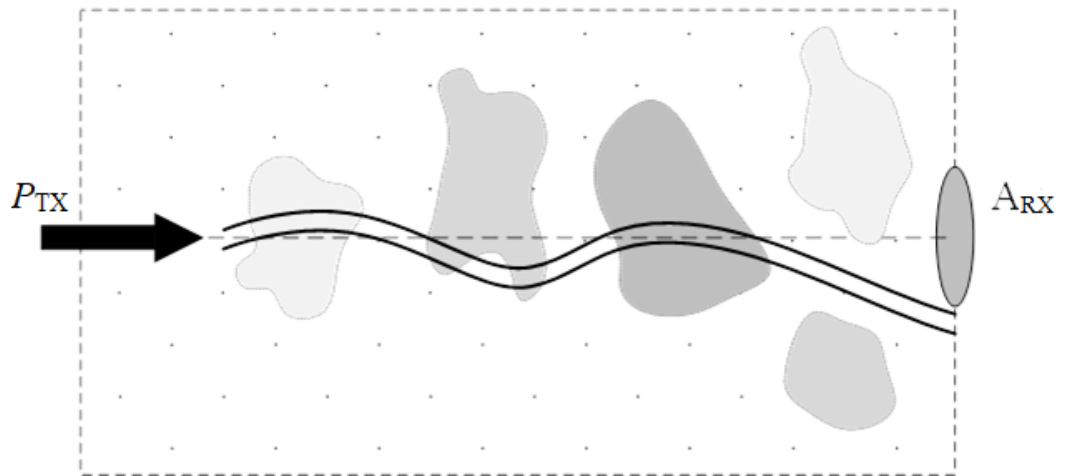
Як правило, для оцінки якості систем оптичного зв'язку використовуються відношення сигнал/шум (SNR) і відношення бітових помилок (BER). Продуктивність BER залежить від середньої отриманої потужності, інтенсивності мерехтіння та шуму приймача. Відношення сигнал/шум під впливом турбулентності із усередненими параметрами запропоновано в [21].

$$SNR(\text{dB}) = 10 \log \left[ \frac{1}{0.31 C_n^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^7 L^{\frac{11}{6}}} \right], \quad (10)$$

де  $L$  – відстань лінії між приймачем,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $C_n$  – показник структури заломлення.  $C_n^2$  вважається постійним із середнім значенням від  $10^{-16}$  до  $10^{-13}$  для слабкої та сильної турбулентності відповідно.



а) Атмосферний канал FSO



б) Лінія FSO з турбулентними елементами

Рис. 4.7. Втрати на лінії FSO пов'язані з а) геометричною розбіжністю випромінювання, б) турбулентністю в атмосфері

Геометричні втрати в каналі FSO залежать від ширини променя, відстані пропускання та площі апертури детектора, як показано на рис. 4.7 (а). Втрати енергії в цьому випадку розраховуються за формулою (5).

Різні математичні підходи до розрахунку запасу потужності оптичної лінії, пов'язані з розходженням пучка, загасанням в атмосфері, атмосферною турбулентністю, помилками наведення, статистичними моделями аналізуються, наприклад, у [22].

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

Особливості структури атмосфери і переваги супутникових технологій дозволяють застосовувати багаторівневі висотні моделі, за допомогою яких можна збільшити пропускну здатність. Можливості підвищення продуктивності за допомогою багаторівневих висотних систем зв'язку базуються на таких факторах:

- в одному тракті використання ММД, ОД, діапазонів LTE, волоконно-оптичних ліній, в залежності від структури атмосфери, погодних умов, територіального розташування;
- в стратосферних платформах і БПЛА передбачається посилення потужності сигналу за рахунок використання сонячної енергії, збільшення спрямованості (підсилення) антени, використання технології MIMO;
- космічна (бортова) станція може виробляти: фільтрацію і перетворення радіочастот, демодуляція/декодування, перемикання/маршрутизацію, кодування /модуляцію.

Середня пропускна здатність відкритих наземних оптичних систем 2 Гбіт/с. Однак із вдосконаленням методів оптоелектронної обробки сигналів швидкість передачі може зрости до сотні (і більше) Гбіт/с.

Розглянемо спадний канал від супутника до земної станції. Параметри для моделювання пропускної здатності Шеннона представлені в табл.4.1.

Таблиця 4.1

Параметри моделювання

Параметр	Величина				
Кут елевації супутника, град	10, ..., 90 град				
Висота LEO-супутника	2000-300 км				
NAPS					
БПЛА	20 км				
	1 км-100 м				
Несуча частота $f_c$	2 ГГц	6 ГГц	28 ГГц	70 ГГц	0.36 ПГц
Ширина каналу $B$	200 МГц	500 МГц	1 ГГц	3 ГГц	100 ГГц
Кут розкриття антени (ширина променя)	5 град	3 град	0,5 град	0,3 град	$6,7 \times 10^{-4}$ град
Потужність передавача ММД	33 дБм				

## Продовження таблиці 4.1

## Параметри моделювання

Параметр	Величина				
Площа апертури приймальної антени наземної базової станції	3 м <sup>2</sup>	3 м <sup>2</sup>	1,5 м <sup>2</sup>	1,5 м <sup>2</sup>	0,2 м <sup>2</sup>
Площа апертури приймальної антени супутника HAPS, БПЛА	0,5-1 м <sup>2</sup>	0,5-1 м <sup>2</sup>	0,5-1 м <sup>2</sup>	0,5-1 м <sup>2</sup>	0,2 м <sup>2</sup>
Поріг відношення сигнал/шум	0 дБ				
Метод модуляції сигналу	ООК, PPM				
Відстань між наземною базовою станцією (BS <sub>E</sub> ) і користувачем для міського сценарію	200 м, 100 м				
Широта	35°				
Радіус Землі R <sub>E</sub>	6371 км				
Температура T	288,15 К				
Концентрація водяної пари	7,5 г/м <sup>3</sup>				
Повітряний тиск	1013,25 гПа				
Варіанти розбиття траси на сегменти	1 сегмент (1000 км, 300 км): Супутник-Земля станція 2 ГГц, 6 ГГц, 28 ГГц, 70 ГГц				
	2 сегменти: Супутник (300 км)-HAPS (20 км)-Земля				
	3 сегменти: Супутник (300 км)-HAPS (20 км)-LAPS (100 м)-Земля				
	4 сегменти: Супутник (300 км)-HAPS (20 км)-LAPS (2 км)-LAPS (100 м)-Земля				

Оптичний космічний зв'язок на лініях Земля-супутник і між супутниками вже давно успішно використовується [16-18]. Сучасні досягнення в галузі космічних технологій та фотонних технологій відкривають нову главу для оптичного космічного зв'язку. Пропускання здатність оптичного каналу сприяє зменшенню часу затримки сигналу і підтримки режиму в реальному часі, що необхідно для багатьох важливих додатків. Але не дивлячись на великий потенціал FSO-зв'язку (Free-Space Optics), її продуктивність обмежена



побічними ефектами (а саме, поглинанням, розсіюванням і турбулентністю) атмосферного каналу, які роблять канал випадковою функцією простору і часу.

З цієї причини в FSO необхідно відстеження і дуже точне наведення оптичного випромінювання до одержувача. Для системи FSO при ясних погодних умовах видимість може мати значення більше 10 миль.

Експериментальні результати [19] продемонстрували для низхідного каналу зв'язку супутник-Земля FSO пропускну здатність до 1,25 Гбіт/с, а також до 10 Гбіт/с для НАР-НАР. Передбачається, що з удосконаленням схем модуляції, пропускну здатність безпроводової мережі FSO може бути збільшена навіть до 100 Гбіт/с. Споживана потужність бортових антен супутників становить, як передбачається від 0,5 до 5 Вт в залежності від швидкості передачі даних на відстань до декількох 1000 км [19]. Системи MIMO FSO можуть також значно збільшити продуктивність.

На рис. 4.8, 4.9 та 4.10 представлені розрахунки інформаційної ємності Шеннона для багаторівневих систем по висоті розташування супутників (НАР, БПЛА).

Проміжний НАР (БПЛА) забезпечує підвищену пропускну здатність за рахунок посилення сигналу від висхідного супутника перед його пересиланням на землю, забезпечуючи при цьому більш швидке розгортання і менші витрати в порівнянні з космічними станціями. На рис. 4.8-4.10 також наводиться порівняльне уявлення роботи багаторівневих систем у вікнах прозорості атмосфери 28-52 ГГц, 70-80 ГГц і в ОД.

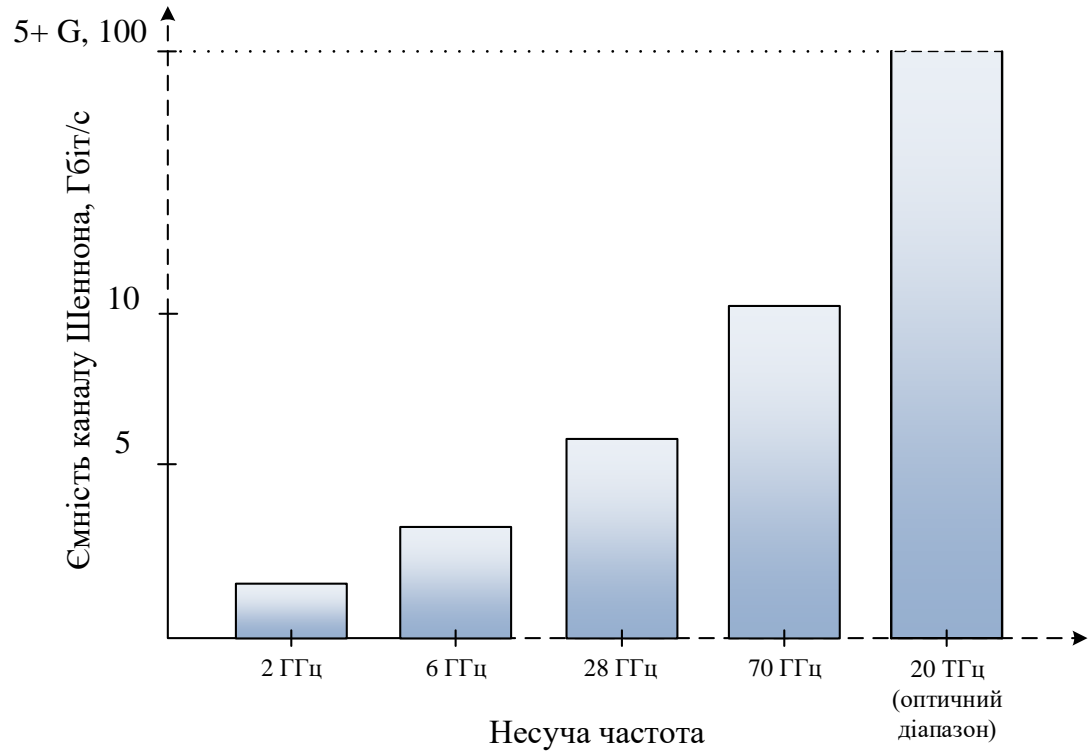


Рис. 4.8. Порівняльне уявлення ємності каналу Шеннона для супутникової лінії LEO-Земля на різних радіо- та оптичному діапазонах

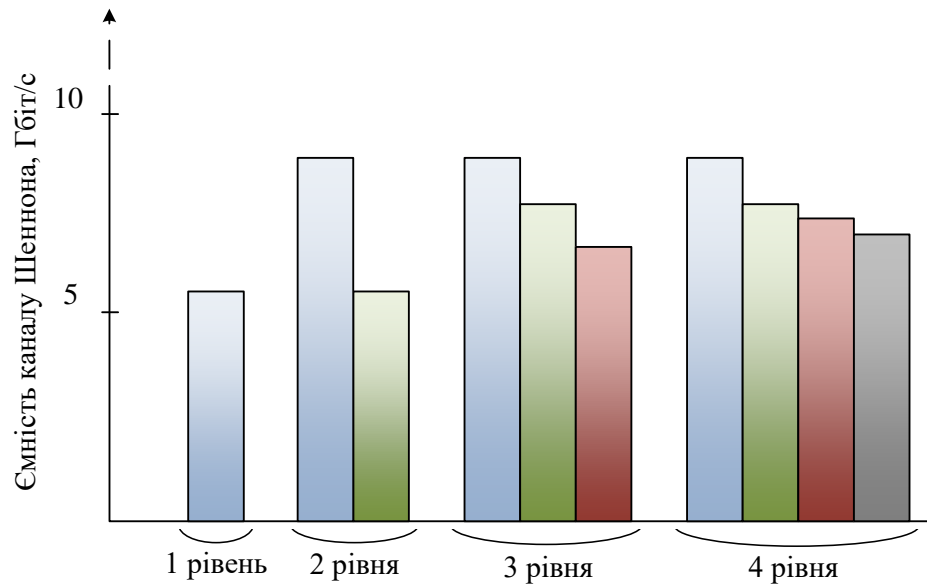


Рис. 4.9. Порівняльне уявлення ємності каналу Шеннона для багаторівневого сценарію супутникової лінії зв'язку, що працює в діапазоні 28

ГГц: 1 рівень LEO-BS<sub>E</sub> (земна базова станція), 2 рівня LEO-НАР-BS<sub>E</sub>, 3 рівня LEO-НАР-UAV-BS<sub>E</sub>, 4 рівня LEO-НАР-UAV<sub>1</sub> (1 км)-UAV<sub>2</sub> (100 м)-BS<sub>E</sub>

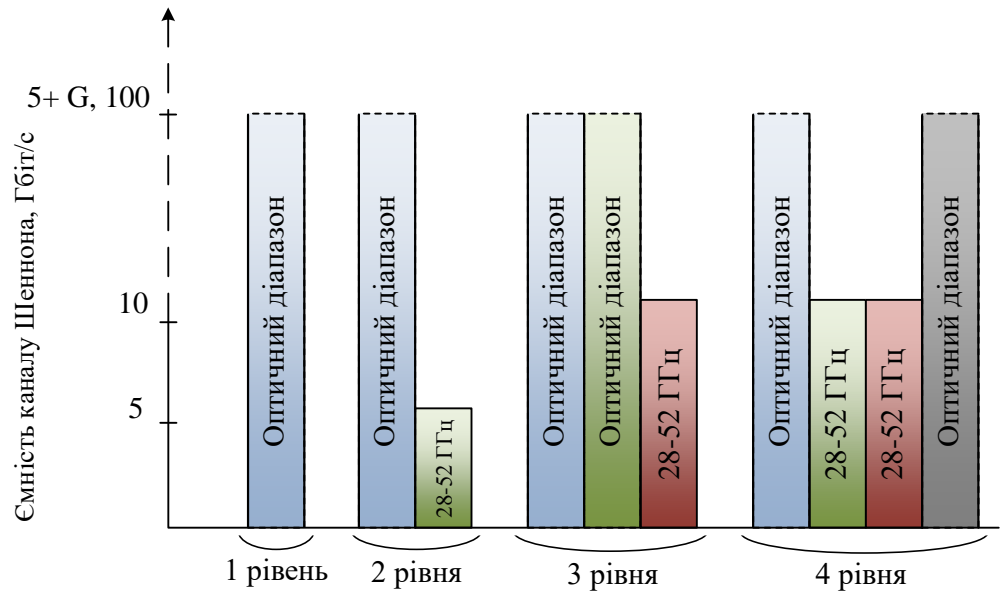


Рис. 4.10. Порівняльне уявлення ємності каналу Шеннона для багаторівневого сценарію супутникової лінії зв'язку: 1 рівень LEO-BS<sub>E</sub> (земна базова станція), 2 рівня LEO-НАР-BS<sub>E</sub>, 3 рівня LEO-НАР-UAV-BS<sub>E</sub>, 4 рівня LEO-НАР-UAV<sub>1</sub> (1 км)-UAV<sub>2</sub> (100 м)-BS<sub>E</sub> на різних радіо- та оптичному діапазонах

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проаналізовано потенційні можливості, перспективи реалізації, проблеми та їх вирішення для неназемних телекомунікацій, що залишаються відкритими напрямками для майбутніх досліджень. Показано, що безпроводовий зв'язок в ММД і ОД має великий потенціал для використання в космічних системах зв'язку. Дані технології мають переваги використання в азимутальних каналах прямої видимості, в порівнянні з наземними. Так, наприклад, повне зенітне загасання може бути набагато менше погонного в нижніх шарах атмосфери. А також має переваги по віртуальності реконфігурації, площі покриття і енергетичної (спектральної) ефективності. Раптове падіння якості зв'язку через атмосферні явища, включаючи сильну атмосферну турбулентність, призводить до необхідності адаптивного динамічного керування променем, яке також призводить до зниження використання ресурсів, як частотних так і енергетичних. Безпроводові і волоконні оптичні системи зв'язку мають схожість по робочому діапазону хвиль, методам обробки. Методи радіофотоніки можуть бути застосовані і для бездротових систем зв'язку, де може бути використана технологія конвертації радіохвиль в оптичний, включаючи терагерцовий діапазон.

Гібридне використання ММД і ОД, багаторівневої конфігурації розташування супутникових ретрансляторів, включаючи НАР і БПЛА, волоконно-оптичних ліній та просунутих методів обробки сигналів в системах космічного зв'язку можуть забезпечити високошвидкісний зв'язок в практично в будь-яку погоду в будь-якій точці Землі. Реалізація високошвидкісних радіоліній багато в чому пов'язана з досягненнями в області фотоніки. Наприклад, створення оптоелектронних методів формування випромінювання в фазованих антенних решітках, використання перспективних форматів модуляції, таких як КАМ високого порядку, імпульсних методів модуляції

оптичного сигналу з поляризаційним ефектом, впровадження технологій MIMO ФАР та нових методів спостереження.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. The Focus Group Network 2030 welcomes you to join and participate. <https://itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Pages/default.aspx>.
2. W. Saad, M. Bennis, and M. Chen / A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems // IEEE network, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2019.
3. H. Kaushal and G. Kaddoum, “Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, 2017.
4. M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies,” IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, Mar. 2020.
5. F. Babich, M. Comisso, A. Cuttin, M. Marchese, and F. Patrone, “Nanosatellite-5G Integration in the Millimeter Wave Domain: A Full Top-Down Approach,” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 19, no. 2, pp. 390–404, Feb. 2020.
6. M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014.
7. M. Giordani and M. Zorzi, "Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities," IEEE Network, pp. 12–19, 2020.
8. J. Yu, X. Li, and W. Zhou, "Tutorial: Broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication," APL Photonics, vol. 3, no. 11, p. 111101, Nov. 2018.
9. S. Jia et al., "THz photonic wireless links with 16-QAM modulation in the 375-450 GHz band," Optics Express, vol. 24, no. 21, p. 23777, Oct. 2016.
10. V. J. Urick, C. S. Sunderman, J. F. Diehl, and N. D. Peterson, "W-Band Technology and Techniques for Analog Millimeter-Wave Photonics," Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, Aug. 2015.

- 11.V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov, J. M. Jornet, and Y. Koucheryavy, "Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems With Blocking and Directional Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1791–1808, Mar. 2017.
- 12.J. Loughran, "Starlink launches 60 more satellites but commercial service faces delays," *Engineering and Technology (IET)*, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2020/11/starlink-launches-60-more-satellites-but-commercial-service-faces-delays/>
- 13.Y. A. Kremenetskaya, E. R. Zhukova, N. V. Gradoboeva, D. A. Lyubas and B. V. Saenko, "Physical aspects of modeling a radio channel and noise in the millimeter range," *Telecommunications and Information Technologies*, No. 8, pp. 60-71, 2018. (in Ukrainian).
- 14.3GPP, "Solutions for NR support for Non-Terrestrial Networks (NTN)," TR 38.821 (Release 16), 2020.
- 15.Recommendation ITU-R P.676, 2005. [Online]. Available: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf)
- 16.M.P. Dolukhanov, *Propagation of radio waves*. - M., Communication, 1972. (in Russ.).
- 17.Hansen *Fazirovannye antennye reshetki (Phased antenna arrays)*. M.: Tekhnosfera, 2012, 560 p. (in Russ.).
- 18.K. V. Kiran, V. Kumar, A. K. Turuk, and S. K. Das, "Estimation of link margin for performance analysis of FSO network," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 827, pp. 444458, Dec. 2018.
- 19.I. Kim and E. J. Korevaar, "Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems," in *Optical Wireless Communications IV*, vol. 4530, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2001, pp. 84 – 95.

20. M. A. Esmail, H. Fathallah, and M.-S. Alouini, "Outdoor FSO communications under fog: Attenuation modeling and performance evaluation," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1–22, 2016.
21. M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014.
22. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1702–1710, 2007.
23. M. S. Alam, S. A. Shawkat, G. Kitazumi, and M. Matsumoto, "IrBurst modeling and performance evaluation for large data block exchange over high-speed IrDA links," *IEICE Trans. Commun.*, vols. E91B, no. 1, pp. 274–285, Jan. 2008.
24. Trichili, M. A. Cox, B. S. Ooi, and M.-S. Alouini, "Roadmap to free space optics," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 37, no. 11, pp. A184–A201, Nov 2020.
25. M. Singh, J. Malhotra, M. S. Mani Rajan, D. Vigneswaran, and M. H. Aly, "A long-haul 100 Gbps hybrid PDM/CO-OFDM FSO transmission system: Impact of climate conditions and atmospheric turbulence," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 1, pp. 785–794, Feb. 2021.
26. C.-Y. Li, X.-H. Huang, H.-H. Lu, Y.-C. Huang, Q.-P. Huang, and S.-C. Tu, "A WDM PAM4 FSO–UWOC Integrated System With a Channel Capacity of 100 Gb/s," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 7, pp. 1766–1776, Apr. 2020.
27. X.-H. Huang et al., "Two-way wireless-over-fibre and FSO-over-fibre communication systems with an optical carrier transmission," *Laser Physics*, vol. 28, no. 7, p. 076207, May. 2018.
28. K. Araki, T. Itabe, M. Takabe, T. Aruga, and H. Inomata, "Experiments on CO<sub>2</sub> laser beam transmission from ground to geostationary meteorological satellite-III," *Laser Sensing Symposium*, pp. 47–48, 1988.



29. Кременецька Я.А. Багаторівнева модель наземних і неназемних телекомунікацій із застосуванням технологій оптичного безпроводового зв'язку. *Зв'язок*, №3 (151). Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021.
30. Яковець В.П., Сивик О.С., Кременецька Я.А. Аналіз та розробка інтегрованих рішень для наземних та супутникових телекомунікацій із застосуванням технологій FSO. XIII Науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ інформації та телекомунікацій». Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021.
31. Топчій В.М., Шеховцов В.С., Кременецька Я.А. Застосування радіо- та оптичного спектру в мережах зв'язку наступних поколінь. XIII Науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ інформації та телекомунікацій». Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021.



# ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

*Тема магістерської роботи:*

## АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА ІНТЕГРОВАНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ НАЗЕМНИХ ТА СУПУТНИКОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ FSO

*Мета роботи:*

*розробка та представлення нових інтегрованих рішень багаторієнєвих  
неназемних телекомунікацій із застосуванням низькоорбітальних супутників,  
стратосферних платформ і безпілотних ретрансляторів в міліметровому та  
оптичному діапазонах*



Слайд 1

**Виконав:**  
студент Яковець В.П.  
**керівник :**  
Кременецька Я.А. д.т.н.

2022

# АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ МАЙБУТНІХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



Порівняння основних показників для мереж 4G, 5G та 6G

**Ціль - нескінченна ємність, безперебійне підключення, доступ в реальному часі та велика масштабованість**

- Реконфігуровані інтелектуальні поверхні
- Нові методи кодування, модуляції та схеми доступу
- Мережі без стільникового зв'язу (англ. cell-free)
- Багаторежимні базові станції
- Квантові методи обробки інформації
- Маленькі стільники

Випице 6 ГГц

Видіме світло

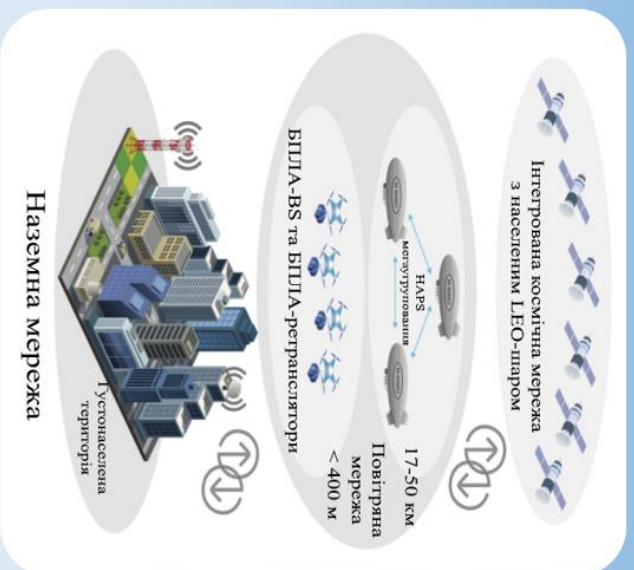
Ключові комунікаційні технології, що пропонуються для майбутніх мереж

Масштаби продуктивності ефективності

Масштаби продуктивності ефективності

# ОСНОВНІ АСПЕКТИ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ У ВИСОТНИХ ПЛАТФОРМАХ НАР ТА UAV

Слайд 3



Повністю інтегрована вертикальна гетерогенна мережа (VNet)

LEO – Низька навколосеземна орбіта (Low Earth Orbit), від 160 км до 2000 км над поверхнею планети.

NARS – Станція на висотній платформі (High Altitude Platform Station), розташована на висоті близько 20 км.

ВПЛА – Безпілотний літальний апарат.

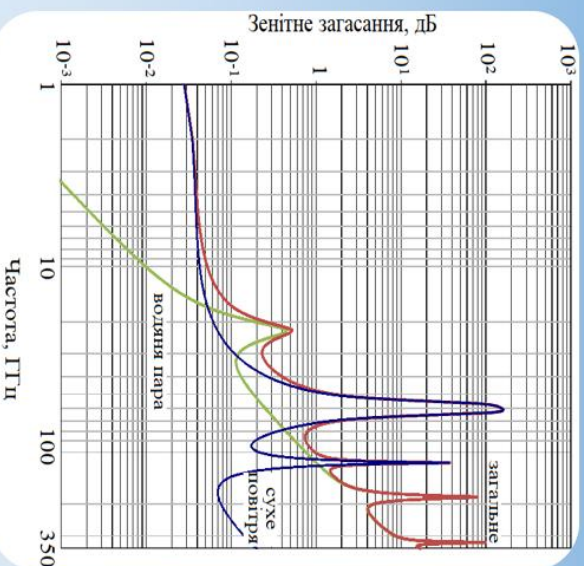
SWAP – Розмір, вага та потужність (Size, Weight and Power), вимоги до параметрів ретрансляційних вузлів (супутники, ВПЛА тощо).



# ДОДАТКОВІ ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ НАРС ПОРІВНЯНО З НИЗЬКООРБИТАЛЬНИМ (LEO) СУПУТНИКОМ

Перевага	Опис
Розгортання на малій висоті з сприятливими умовами для каналу	<ul style="list-style-type: none"> <li>Очікується, що розгортання сузір'я <u>НАРС</u> буде на нижчій висоті порівняно із супутниками <u>LEO</u>, розташованими від 350 км до 2000 км, що призведе до сприятливого бюджету каналу та високого співвідношення сигнал/шум (SNR) для низхідної лінії зв'язку, що забезпечує перевагу покриття. Відносно висхідної лінії зв'язку, відносно низькі втрати на шляху дають змогу використовувати <u>UE</u>-термінали, які мають обмежені рівні потужності передачі, без потреби в спеціалізованих наземних станціях.</li> </ul>
Майже стаціонарне розташування	<ul style="list-style-type: none"> <li>Супутники <u>LEO</u> можуть перетинати континенти протягом декількох хвилин через їх високу швидкість. Як наслідок, частина потужностей супутникового зв'язку <u>LEO</u> витрачається, коли вони проходять над океанами та малонаселеними районами. Навпаки, відносно стаціонарне положення систем <u>НАРС</u> запобігає втратам потужності.</li> <li>Стаціонарне положення каналів дозволяє уникнути значного <u>допферівського</u> зсуву.</li> </ul>
Зменшена затримка в обидві сторони	<ul style="list-style-type: none"> <li>Через меншу висоту система <u>НАРС</u> відповідає затримці в обидва боки від 0,13 до 0,33 мс, що робить їх хорошим варіантом для програм із низькою затримкою, таких як <u>URLLC</u>. Отже, система зв'язку на основі сузір'я <u>НАРС</u> може подолати притаманну супутниковим мережам проблему високої затримки.</li> </ul>
Переваги розгортання та обслуговування	<ul style="list-style-type: none"> <li>Витрати та ризики розгортання нижчі у випадку систем <u>НАРС</u> порівняно з <u>LEO</u>. Більш того, системи <u>НАРС</u> легше повернути на землю, коли вони закінчать свою місію, тоді як супутники неможливо відновити.</li> </ul>

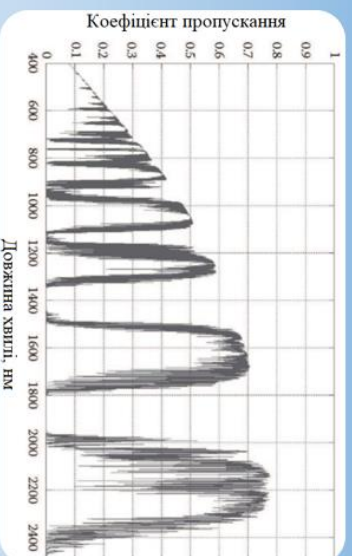
# ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИЧНОГО ТА РАДІОЧАСТОТНОГО СПЕКТРУ В БАГАТОРІВНЕВІЙ СТРУКТУРІ МЕРЕЖІ



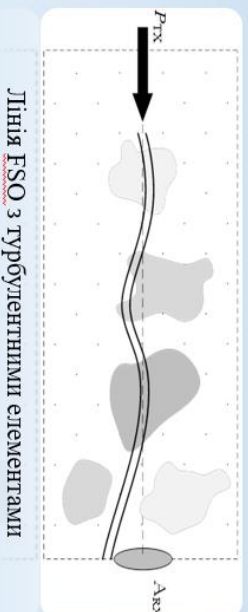
Загальне зенітне загасання, загасання в  
 1 сухому повітрі і водяній парі (писк = 320  
 1013,25 гПа; температура = 15° С;  
 щільність водяної пари = 7,5 г/м<sup>3</sup>)

- Ключовими рішеннями для підвищення продуктивності безпроводових телекомунікаційних мереж може бути застосування хвиль ММД та ОД, які дозволяють організувати канали передачі з шириною в кілька гігерц, а пропускна здатність відповідає ширині каналу.
- Діапазон 60 ГГц, де спостерігається сильне поглинання в атмосфері, розглядається як варіант для організації мікростільників, так як природне поглинання обмежує розмір стільників.
- Застосування ОД та ММД планується також для використання в неназемних системах зв'язку. Наприклад, у проекті [Starlink](#) другим етапом планується виведення більше 7500 апаратів на висоту 340 км, що почнуть працювати в V-діапазоні (40-75 ГГц).

# ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ FSO В НЕНАЗЕМНИХ МЕРЕЖЕВИХ АРХІТЕКТУРАХ



Коефіцієнт пропускання атмосфери в залежності від довжини оптичної хвилі



Лінія FSO з турбулентними елементами

Для космічних систем зв'язку, де відсутнє атмосферне поглинання сигналів, оптимальним варіантом є використання ОД. Втраги в оптичному відкритому каналі можна представити як:

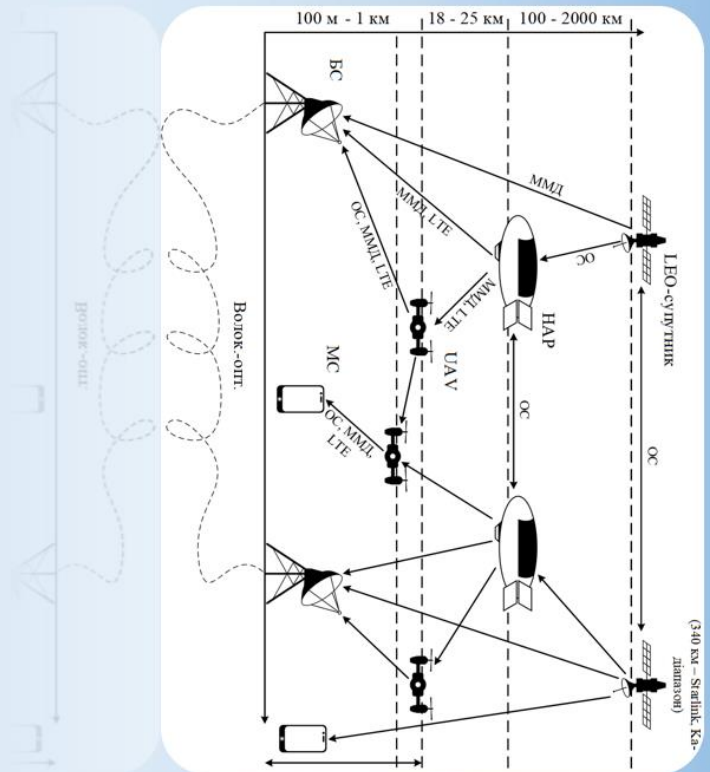
$$PE = PL_{atm} + PL_{geo} + PL_{sys},$$

де  $PL_{geo}$  — геометричне загасання,  $PL_{atm}$  — атмосферне загасання, а  $PL_{sys}$  — втраги системи.



# АРХІТЕКТУРА БАГАТОРІВНЕВОГО КОСМІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛЕО-СУПУТНИКІВ, НАРС ТА БПЛА

Слайд 7



- Структурні елементи багаторівневого космічного зв'язку:
- Космічні супутники зв'язку (LEO/MEO/GEO);
- Стратосферні платформи (High Altitude Platform – HAP);
- Низьковисотні платформи (Low Altitude Platform – LAP) або безпілотні літальні апарати (БПЛА, англ. Unmanned Aerial Vehicle – UAV), до яких відносять також як прив'язні повітряні кулі.



## ПАРАМЕТРИ МОДЕЛЮВАННЯ

Параметр	Величина				
Кут елевачії супутника, град	10, ..., 90 град				
Висота ЛЕО-супутника	2000-300 км				
НАРС	20 км				
	1 км-100 м				
ВПЛА	2 ГГц	6 ГГц	28 ГГц	70 ГГц	0.36 ПГц
	200 МГц	500 МГц	1 ГГц	3 ГГц	100 ГГц
Кут розкриття антени (ширина променя)	5 град	3 град	0,5 град	0,3 град	6,7x10 <sup>-4</sup> град
	Потужність передавача ММД	33 дБм			
Площа апертури приймальної антени наземної базової станції	3 м <sup>2</sup>	3 м <sup>2</sup>	1,5 м <sup>2</sup>	1,5 м <sup>2</sup>	0,2 м <sup>2</sup>
	Площа апертури приймальної антени супутника НАРС, ВПЛА	0,5-1 м <sup>2</sup>	0,5-1 м <sup>2</sup>	0,5-1 м <sup>2</sup>	0,5-1 м <sup>2</sup>
Поріг відношення сигнал/шум	0 дБ				
Метод модуляції сигналу	ООК, РРМ				
Відстань між наземною базовою станцією (BS <sub>2</sub> ) і користувачем для міського сценарію	200 м, 100 м				
	Широта	35°			
Радіус Землі R <sub>e</sub>	6371 км				
Температура, концентрація водяної пари, повітряний тиск	288,15 К, 7,5 г/м <sup>3</sup> , 1013,25 гПа				
	1 сегмент (1000 км, 300 км): Супутник-Земля станція 2 ГГц, 6 ГГц, 28 ГГц, 70 ГГц				
	2 сегменти: Супутник (300 км)-НАРС (20 км)-Земля				
	3 сегменти: Супутник (300 км)-НАРС (20 км)-LARS (100 м)-Земля				
Варіанти розбиття траси на сегменти	4 сегменти: Супутник (300 км)-НАРС (20 км)-LARS (2 км)-LARS (100 м)-Земля				

# МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БЮДЖЕТУ (ПОТЕНЦІАЛУ) КАНАЛУ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

- Енергетичний потенціал радіоканалу:

$$P_{\text{TX}} [\text{dBm}] - P_{\text{RX-sens}} [\text{dBm}] = PE [\text{dBm}]$$

- Чутливість приймача:

$$\frac{P_{\text{RX-sens}}}{(N_{\text{int}} + N_{\text{TX}} + N_{\text{RX}})} = \frac{P_s}{N}$$

- Модель розрахунку втрат в космічному радіоканалі:

$$PL [\text{dBm}] = PL_e + PL_b + PL_g + PL_s$$

- Втрати на вході в будівлю:

$$PL_e(p) = 10 \log_{10} (10^{0.14} + 10^{0.1B} + 10^{0.1C})$$

- Загасання через атмосферні гази:

$$PL_g(\alpha, f_c) = \frac{A_{zenit}(f_c)}{\sin \alpha}$$

- Втрати FSPL взяті з моделі Фрііса:

$$FSPL(d, f_c) = 32.45 + 20 \log_{10}(f_c) + 20 \log_{10}(d)$$

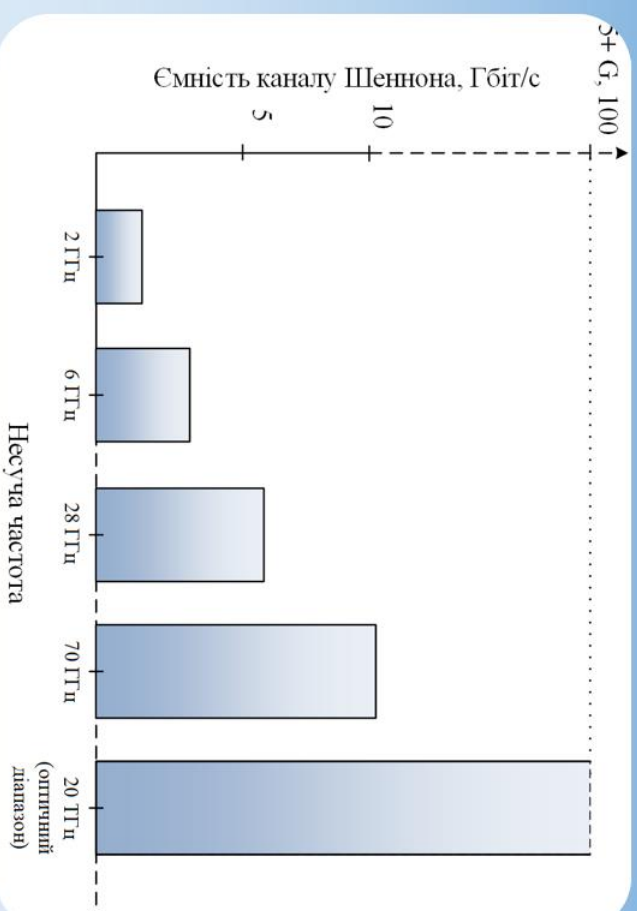
- Рівняння Шеннона для оцінки взаємозв'язаних величин спектральної, енергетичної ємності та пропускної спроможності:

$$C = B \log_2 (1 + SNR)$$

- Співвідношення сигнал/шум SNR:

$$SNR = P_{\text{RX}} / (N_{\text{int}} + N_{\text{TX}} + N_{\text{RX}})$$

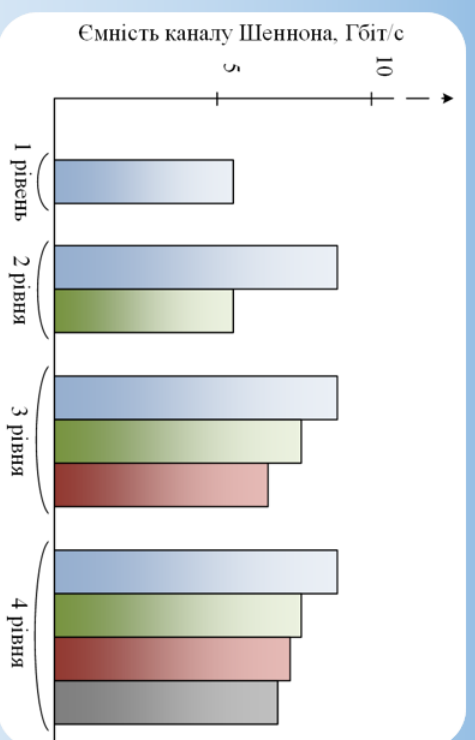
# ПОРІВНЯННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ БАГАТОРІВНЕВИХ СИСТЕМ У ВІКНАХ ПРОЗОРОСТІ АТМОСФЕРИ 28-52 ГГц, 70-80 ГГц І В ОД



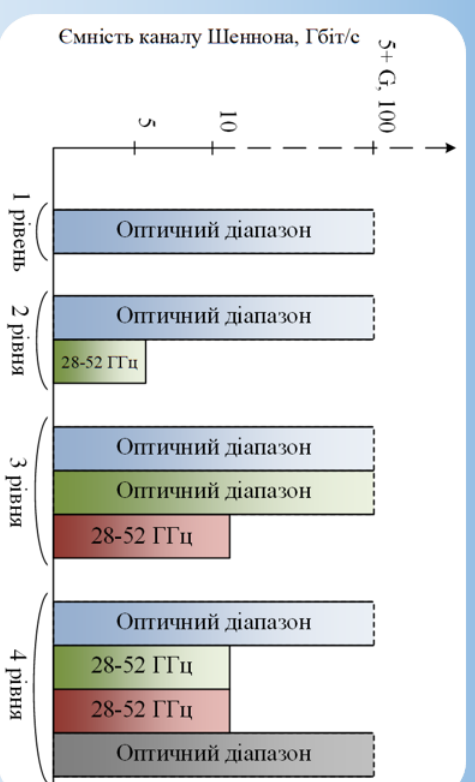
Порівняльне уявлення ємності каналу Шеннона для супутникової лінії ЛEO-Земля на різних радіо- та оптичному діапазонах

оптичному діапазонах

# ПОРІВНЯННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ БАГАТОРІВНЕВИХ СИСТЕМ У ВІКНАХ ПРОЗОРОСТІ АТМОСФЕРИ 28-52 ГГц, 70-80 ГГц І В ОД



Порівняльне уявлення смності каналу Шеннона для багаторівневого сценарію супутникової лінії зв'язку, що працює в діапазоні 28 ГГц: 1 рівень LEO-BS<sub>E</sub> (земна базова станція), 2 рівня LEO-NAR-BS<sub>E</sub>; 3 рівня LEO-NAR-UAV-BS<sub>E</sub>; 4 рівня LEO-NAR-UAV<sub>1</sub> (1 км)-UAV<sub>2</sub> (100 м)-BS<sub>E</sub>



Порівняльне уявлення смності каналу Шеннона для багаторівневого сценарію супутникової лінії зв'язку: 1 рівень LEO-BS<sub>E</sub> (земна базова станція), 2 рівня LEO-NAR-BS<sub>E</sub>; 3 рівня LEO-NAR-UAV-BS<sub>E</sub>; 4 рівня LEO-NAR-UAV<sub>1</sub> (1 км)-UAV<sub>2</sub> (100 м)-BS<sub>E</sub> на різних радіо- та оптичному діапазонах



# ВИСНОВКИ

- У магістерській роботі проаналізовано потенційні можливості, перспективи реалізації, проблеми та їх вирішення для неназемних телекомунікацій, що залишаються відкритими напрямками для майбутніх досліджень.
- Безпроводовий зв'язок в ММД і ОД має великий потенціал для використання в космічних системах зв'язку. Дані технології мають переваги використання в азимутальних каналах прямої видимості, в порівнянні з наземними. Так, наприклад, повне зенітне загасання може бути набагато менше погонного в нижніх шарах атмосфери, в спенаріях міської забудови. А також має переваги по віртуальності реконфігурації, площі покриття і за енергетичною (спектральною) ефективністю.
- Раптове падіння якості зв'язку через атмосферні явища, включаючи сильну атмосферну турбулентність, призводить до необхідності адаптивного динамічного керування променем, яке також призводить до зниження використання ресурсів, як частотних так і енергетичних.
- Рішення поєднання переваг наземних та неназемних телекомунікаційних систем, технологій FSO та високочастотного діапазону ММД, багаторівневої рухомої конфігурації супутникових ретрансляторів, включаючи НАР і БПДА, просунутих методів обробки сигналів можуть забезпечити високошвидкісний зв'язок в практично в будь-яку погоду в будь-якій точці Землі.

# ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

За темою магістерської роботи були опубліковані наступні статті:

- Кременецька Я. А., Макаренко А. О., Яковець В. П. Багаторівнева модель наземних і наземних телекомунікацій із застосуванням технології оптичного безпроводового зв'язку. *Зв'язок*, №3 (151). Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021.
- Сивик О. С., Олійник Н. О., Стодарцев І. М., Сидоренко О. В., Яковець В. П., Кременецька Я. А. Аналіз напрямків розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій. Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021.

Тези:

- Яковець В. П., Сивик О. С., Кременецька Я. А. Аналіз та розробка інтегрованих рішень для наземних та супутникових телекомунікацій із застосуванням технологій FSO. XIII Науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ інформації та телекомунікацій». Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021.

Дякую за увагу.

# АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ МАЙБУТНІХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 621.398.96

Сивик О.С., Олійник Н.О., Сподарцев І.М., Сидоренко О.В., Яковець В.П.,  
Кременецька Я.А.

*Державний університет телекомунікацій, Київ*

*Syvyk O. S., Oliinyk N. O., Spodartsev I. M., Sydorenko O. V., Yakovets V. P., Kremenetska Y. A.. Analysis directions for the development of future telecommunication technologies. The sixth generation (6G) of mobile networks is expected to be implemented in the next decade. The development of forecasts, applications, technologies and 6G standards has already become a popular research topic. The article analyzes new services and applications, such as holographic media programs, multisensory technologies. Basic technological solutions that solve the problems of existing fifth generation (5G) mobile networks are analyzed. These limitations include data rates, latency, reliability, availability, processing, connection density, and global coverage. Highlighted social and technological trends that initiate the movement to 6G. The most modern researches, technical problems which promote development of telecommunication technologies are discussed. The requirements and key technologies required for the implementation of 6G applications are presented in detail.*

**Keywords:** 5G, 6G, Network2030, holographic communications, telepresence, multisensor networks, future networks

*Сивик О. С., Олійник Н. О., Сподарцев І. М., Сидоренко О. В., Яковець В. П., Кременецька Я. А.. Аналіз напрямків розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій. Очікується, що шосте покоління (6G) мобільних мереж буде реалізовано в найближче десятиліття. Розробка прогнозів, додатків, технологій і стандартів 6G вже стала популярною темою досліджень. У статті аналізуються нові послуги та*

додатки, як голографічні медіа-програми, мультисенсорні технології. Проаналізовано базові технологічні рішення, які вирішують проблеми існуючих мобільних мереж п'ятого покоління (5G). Ці обмеження стосуються швидкості передачі даних, затримки, надійності, доступності, обробки, щільності з'єднання та глобального покриття. Освітлені соціальні та технологічні тенденції які ініціюють рух до 6G. Обговорюються найсучасніші дослідження, технічні проблеми, які сприяють розвитку телекомунікаційних технологій. Докладно представлено вимоги та ключові технології, необхідні для реалізації додатків 6G.

**Ключові слова:** 5G, 6G, Network2030, голографічні комунікації, телеприсутність, мультисенсорні мережі, майбутні мережі

**Сывик А. С., Олейник Н. О., Сподарцев И. М., Сидоренко О. В., Яковец В. П., Кременецкая Я. А. Анализ направлений развития будущих телекоммуникационных технологий.** Ожидается, что шестое поколение (6G) мобильных сетей будет реализовано в ближайшее десятилетие. Разработка прогнозов, приложений, технологий и стандартов 6G уже стала популярной темой исследований. В статье анализируются новые услуги и приложения, как голографические медиапрограммы, мультисенсорные технологии. Проанализированы базовые технологические решения, решающие проблемы существующих мобильных сетей пятого поколения (5G). Эти ограничения касаются скорости передачи данных, задержки, надежности, доступности, обработки, плотности соединений и глобального покрытия. Освещены социальные и технологические тенденции, которые инициируют движение к 6G. Обсуждаются самые современные исследования, технические проблемы, способствующие развитию телекоммуникационных технологий. Подробно представлены требования и ключевые технологии, необходимые для реализации приложений 6G.

**Ключевые слова:** 5G, 6G, Network2030, голографические коммуникации, телеприсутствие, мультисенсорные сети, будущие сети



## Вступ

В останні роки інновації у сфері хмарних обчислень, мультимедіа з високою роздільною здатністю, мобільних мереж, сенсорних технологій тощо сприяли створенню абсолютно нового набору додатків та галузевих вертикалей. Мережі мобільного зв'язку 5G вже розгортаються по всьому світу. 5G підтримує поліпшений мобільний широкопasmовий зв'язок (eMBB) для забезпечення пікової швидкості передачі даних до 10 Гбіт/с. Крім того, наднадійний зв'язок з малою затримкою (uRLLC) зводить до мінімуму затримки до 1 мс, в той час як масовий зв'язок машинного типу (mMTC) підтримує більш ніж в 100 разів більше пристроїв на одиницю площі у порівнянні з 4G. Очікувана надійність і доступність мережі становить понад 99,999%. Програмне забезпечення мережі – це відома технологія 5G, яка забезпечує динамічність, програмованість і абстракцію мереж. Можливості 5G дозволили використовувати нові додатки, такі як віртуальна реальність (Virtual Reality – VR), доповнена реальність (Augmented Reality – AR), змішана реальність (Mixed Reality – MR), автономні транспортні засоби, Інтернет речей (Internet of Things – IoT) і автоматизована промисловість.

Як надається в прогнозуванні майбутніх технологій FG-NET-2030 [1], одна з ключових відмінностей між сучасними мережами та майбутніми мережами полягає в тому, що останні будуть базуватися на абсолютно нових технологіях, як апаратних, так і програмних. Вони повинні бути сумісними з нинішнім та майбутніми поколіннями та новими утвореннями космічних мереж. Очікується, що мережі 6G будуть більш функціональними, інтелектуальними, надійними, масштабованими і енергоефективними, щоб задовольнити всі очікування, які неможливо реалізувати за допомогою 5G. 6G також потрібно для задоволення будь-яких нових вимог, таких як підтримка нових технологій, додатків і нормативних вимог, які виникнуть в найближче десятиліття. 6G відповідно до подання сьогодні: мережі мобільного зв'язку 6G, як очікується, будуть забезпечувати екстремальні пікові швидкості передачі даних

більше 1 Тбіт/с. Наскрізні затримки будуть непомітними і становитимуть менше 0,1 мс. Мережі 6G нададуть доступ до потужних периферійних інтелектуальних засобів, у яких затримки обробки даних впадуть нижче 10 нс (рис.1. [1,2])

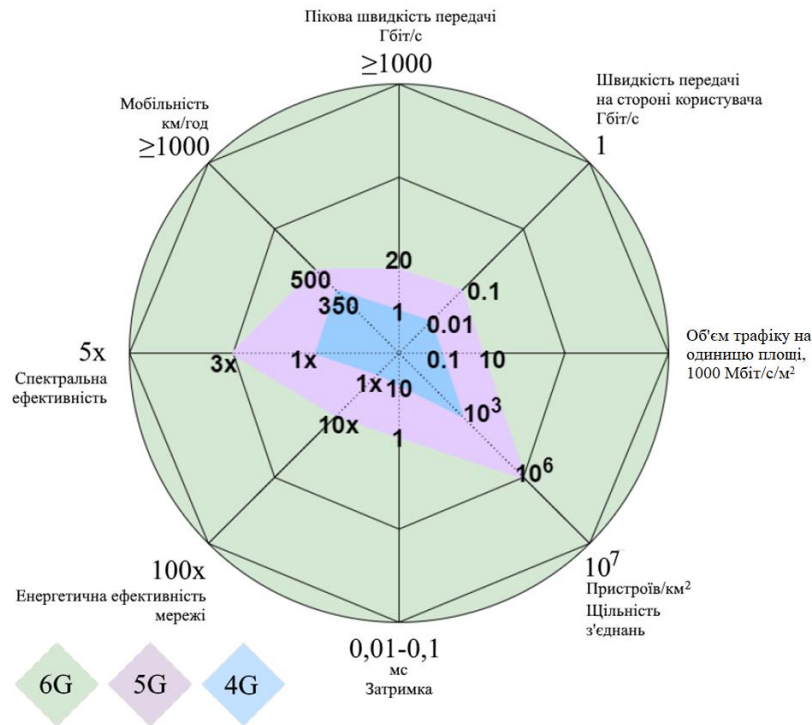


Рисунок 1. Порівняння основних показників для мереж 4G, 5G та 6G

### Нові послуги та додатки

Наступний рубіж у мультимедіа після доповненої реальності та віртуальної реальності (AR/VR) включатиме голографічні медіа та мультисенсорні технології, включаючи послуги тактильного зв'язку. Незабаром наш досвід роботи з AR/VR визначить, що вони недостатньо реальні, вимагаючи створення нового медіа, не обтяженого HMD, що є набагато більш привабливим та реалістичним через його справжнє відображення об'єкта. Голографічні медіа-програми не обмежуються сферою розваг та телеконференцій, але починають з'являтися більш цікаві програми, деякі з яких впливають на життя (наприклад, телехірургія), тоді як інші забезпечують чудову взаємодію (віддалена голографічна присутність).

## Голографічні комунікації

Технологія голографічного дисплея зробила значний прогрес за останні роки, починаючи від дисплеїв світлового поля та закінчуючи різними видами НМД. Оскільки наука та техніка для створення та візуалізації голограм добре зрозумілі, голографічні програми знаходяться на шляху до втілення в реальність. Ці програми включатимуть не лише локальне відображення голограм, але й мережеві аспекти, зокрема можливість передавати та передавати потокові голографічні дані з віддалених сайтів, які називаються «Зв'язок голографічного типу» (НТС).

Далеко не просто технологічний трюк, НТС має багато корисних застосувань. Наприклад, голографічна телеприсутність дозволить віддаленим учасникам проектувати присутність в одну кімнату. І навпаки, голографічні програми із ефектом занурення у віртуальну реальність перетворюють артефакти з віддаленого місця в кімнату, переводячи місцевих користувачів у віддалене місце. Дистанційне усунення несправностей і ремонтні програми дозволять технічним фахівцям взаємодіяти з голографічними візуалізаціями предметів у віддалених і важкодоступних місцях, наприклад, на платформі для буріння нафти або всередині космічного зонда. Голографічні вивіски, які передають голографічний вміст, який централізовано управляється та розповсюджується, є природним наступним кроком для цифрових вивісок. Навчальні та освітні програми можуть надати віддаленим студентам можливість взаємодіяти з предметами та іншими однокурсниками для активної участі в аудиторії. Крім того, є великі можливості у сферах захоплюючих ігор та розваг.

Щоб НТС перетворився в реальність, у майбутньому мережам доведеться вирішувати численні проблеми. Вони повинні забезпечувати дуже високу пропускну здатність через великі обсяги даних, які беруть участь у передачі високоякісних голограм(рис.2). «Якість» голограми включає не тільки глибину кольору, роздільну здатність та частоту кадрів, як у відео, але також включає передачу об'ємних даних з різних точок зору для врахування зрушень у нахилу, кутів та положення спостерігача щодо голограми («Шість ступенів свободи»). Потік базових об'ємних даних та масивів

зображень накладає додаткові вимоги до синхронізації, щоб забезпечити плавні переходи для перегляду користувачем.



Рис. 2. Застосування голографічного медіа

Виходячи за межі потокової передачі голографічної інформації, деякі програми можуть додатково поєднувати голографічні зображення з даними з інших потоків. Наприклад, відео- та аудіопотік може бути отриманий з точки зору того, де проектується голограма. Це можна досягти шляхом накладання голограм на відповідні камери, мікрофони чи інші датчики. Для того, щоб це працювало, потрібна чітка синхронізація між кількома потоками даних, але результатом стануть програми, які забезпечують ще більш реалістичне відчуття взаємодії користувачів.

Другий набір розширень стосується поєднання НТС з тактильними мережевими програмами, що дозволяє користувачам «торкатися» голограми. Це відкриває нові можливості для таких додатків, як згадані для навчання та дистанційного ремонту. Додатки для тактильних мереж накладають вимоги надзвичайно низької затримки (для забезпечення точного відчуття зворотного зв'язку дотику) до базових мереж і,

зокрема, що стосується критично важливих програм, таких як віддалена хірургія. З'єднання тактильних мереж з НТС вводить додаткові вимоги до високоточної синхронізації, щоб забезпечити належну координацію всіх різних потоків даних.

### **Мультисенсорні (Multi-Sense) мережі**

При обговоренні мережевих додатків, які включають не тільки оптичне (відео, голограми) та акустичне (аудіо) почуття, але й дотик (тактильне), виникає питання: чому зупинятися на досягнутому; а як щодо інших органів чуття? Дійсно, щоб створити повністю захоплюючі враження, має сенс також залучити почуття запаху та смаку. На відміну від зору та слуху, нюх і смак вважаються «нижчими» органами почуттів. Як правило, вони не привертають уваги і не керують людською діяльністю, а більше пов'язані з почуттями та емоціями. Це «близькі почуття», оскільки їх сприйняття включає пряму (хімічну) реакцію агента, який сприймається за допомогою рецептора. На відміну від цього, органи чуття як слух і зір, дозволяють сприймати інформацію з віддалених джерел, а артефакти передаються хвилями, а не хімічними або фізичними реакціями. Той факт, що відбувається хімічна реакція, створює значну перешкоду для подолання, а саме проблему того, як побудувати ефективні виконавчі механізми. Деякі обмежені успіхи були досягнуті за допомогою «цифрових льодяників», пристроїв, вставлених у рот людини, які доставляють невеликі струми та перепади температури до сосочків язика (датчики смаку), щоб імітувати такі відчуття, як кислинка, солоність або солодкість. Запах є ще більш складною проблемою. Деякі дослідники запропонували транскраніальну магнітну стимуляцію [2], тобто набір електричних магнітів (наприклад, вбудованих у гарнітуру) для доставки стимулів до областей мозку, відповідальних за створення сенсорних відчуттів.

Навіть більше, ніж мережева індустрія, харчова промисловість дуже зацікавлена у проривах у цій сфері. Наприклад, здатність генерувати «цифрову солодкість» обіцяє можливість скоротити використання цукру або штучних підсолоджувачів. Хоча справжні прориви в виконавчих механізмах, які передають цифровий нюх і смак,

здаються на даний момент далекими, припускаючи, що ці перешкоди можна подолати, очевидно, будуть цікаві потенційні мережеві програми. Наприклад, рішення для дистанційного навчання, а також цифрова реклама можуть використовувати той факт, що збереження пам'яті можна покращити за рахунок асоціації з запахами та смаками. Цифровий досвід можна покращити, зокрема, оскільки запахи та смаки можуть викликати або посилити емоції. Наприклад, певні зображення можуть бути пов'язані з певним запахом. Хмарні медичні рішення можуть викликати гіркі смаки з віддалених місць, щоб запобігти вживанню певних продуктів у певний час у рамках дієтичного режиму. Хоча існують додаткові фактори, що впливають на відчуття смаку, такі як текстура, враховуючи, що кількість рецепторів у язика (близько 8000) приблизно на 4 порядки менше, ніж кількість рецепторів у сітківці ока (близько 150 мільйонів), обсяг «смакових» даних, які необхідно передати, буде значно меншим, ніж те, що потрібно для передачі зображень. Крім того, оскільки виявлення смаку в людському тілі може зайняти цілу секунду, жодних особливих вимог щодо підтримки наднизької затримки не висувається. Подібні міркування стосуються даних про аромати, незважаючи на те, що затримка, пов'язана з виявленням ароматів людиною, значно менша.

### **Програми, спроектовані з вимогою до точного часу**

Людський інтелект, природно, пристосовується до порушень та непередбачуваних подій і може терпіти певні затримки у передачі інформації. Ми адаптувалися до мережевих послуг, які намагаються докласти максимум зусиль, чекаючи повторного підключення та повторюючи спробу при збоях, і ми здатні обробляти голосові або відеозв'язки, які зазнають втрати пакетів або значного тремтіння. Однак протягом останніх десятиліть у міру розвитку технологій наша залежність від мереж зв'язку зросла. Оскільки ми включаємо все більше пристроїв та гаджетів, швидкі реакції та досвід роботи в режимі реального часу стали основними факторами для безперебійної роботи у повсякденній роботі.

Зокрема, коли ми розглядаємо ринкові фактори, такі як промислова автоматизація, автономна система та великі мережі датчиків, де люди не є кінцевою точкою, фактор часу стає ще більш значним, оскільки більшість машин не запрограмовані на адаптацію: вони спеціально створені для конкретні завдання та детерміновані ланцюги управління. Те, що вказує на більш високий ступінь складності, – це тип часових атрибутів, які стосуються Network2030. Це стосується не лише відносних характеристик, таких як швидкий або повільний, але й стосується точного часу події чи доставки даних. Енергоефективність та використання машин надзвичайно актуальні для економіки виробництва в автоматизації промисловості. Використання максимізується, коли час очікування кожної частини обладнання близький до нуля, а енергія економиться, коли усуваються повторні спроби. З'єднання об'єктів на коротких відстанях в промисловому Інтернеті, такі як контролери з програмною логікою (КПЛ), датчики та виконавчі механізми, повинні працювати з точністю часу в межах 10 мілісекунд.

Подібним чином, автономні системи руху навіть на невеликій радіальній відстані в дві милі матимуть з'єднані кінцеві точки порядку десятків тисяч транспортних засобів, сигналів дорожнього руху, вмісту та інших компонентів. Для гармонізації роботи таких щільно взаємопов'язаних механізмів необхідна своєчасна доставка інформації. У цьому випадку корисно знати, в який саме час надходить інформація: все, що надходить рано чи пізно, не має сенсу.

Створення однакових цифрових середовищ у багатосторонніх додатках, таких як онлайн-ігри або віддалена співпраця, вимагатиме справжньої синхронізації об'єктів у системі відліку на кількох сайтах. Новий набір проблем виникає, коли переміщення фізичного об'єкта потрібно буде вчасно координувати між сайтами, які обслуговуються каналами зв'язку, які працюють із різною затримкою. Оскільки межі між цифровими об'єктами та об'єктами реального світу розмиваються, нам потрібна система зв'язку, яка може координувати між різними джерелами інформації, щоб усі залучені сторони мали синхронізований погляд на додаток.

## **Критична інфраструктура**

Критична інфраструктура відноситься до тих основних активів, які вважаються життєво необхідними для безперебійного функціонування суспільства як цілісного утворення. Незважаючи на те, що кібер- та Інтернет-безпека є центром уваги в нинішніх системах ІКТ, очікування щодо захисту та захисту суспільства від надзвичайних ситуацій за допомогою технологічного прогресу, як очікується, зростуть у наступному десятилітті настільки, наскільки нові можливості будуть потрібні для забезпечення безпечного порятунку суб'єктів у будь-якому місці і в будь-який час у разі будь-якої надзвичайної ситуації. Виявлення цих можливостей також є однією з першочергових цілей Network2030. Забігаючи на перспективу, критичні операції з безпеки повинні враховувати всі особливості суб'єктів, які перебувають у зоні надзвичайної ситуації. Наприклад, завжди мати доступне місцезнаходження, поки не врятують, наводячи його на мережевий пристрій суб'єкта з посиланням на карту місцевості, до якої можна отримати доступ за допомогою навігаційної системи безпечного шляху, та забезпечуючи необхідні дії.

Зокрема, Network2030 повинна визначити, як суб'єкт, пов'язаний з терміналом (наприклад, телефон або планшетний пристрій), буде користуватися послугами, розробленими фахівцями з цих надзвичайних ситуацій для цього предмета та для цього типу надзвичайних ситуацій. Очевидно, що послуги, орієнтовані на час, згадані раніше, є засобами підтримки; крім того, необхідно додатково вивчити, що передбачає розвиток таких послуг у неоднорідних, незалежних інфраструктурах. Проблема, яку такі послуги могли б вирішити, з кожним роком стає все більш гострою та актуальною однаково для розвинених країн та країн, що розвиваються. Це пояснюється як природними причинами, так і основними напрямками розвитку світу: спостерігається зростання активності глобальних процесів, таких як землетруси, повені тощо, існує тенденція до урбанізації населення, відбувається поглиблення співпраці всередині та між національними державами, що посилює зустрічний потік товарів та населення;



зростає використання територій країн, розташованих у субтропічних та тропічних зонах.

Ключові комунікаційні технології, що пропонуються для майбутніх мереж представлено на рис. 3.

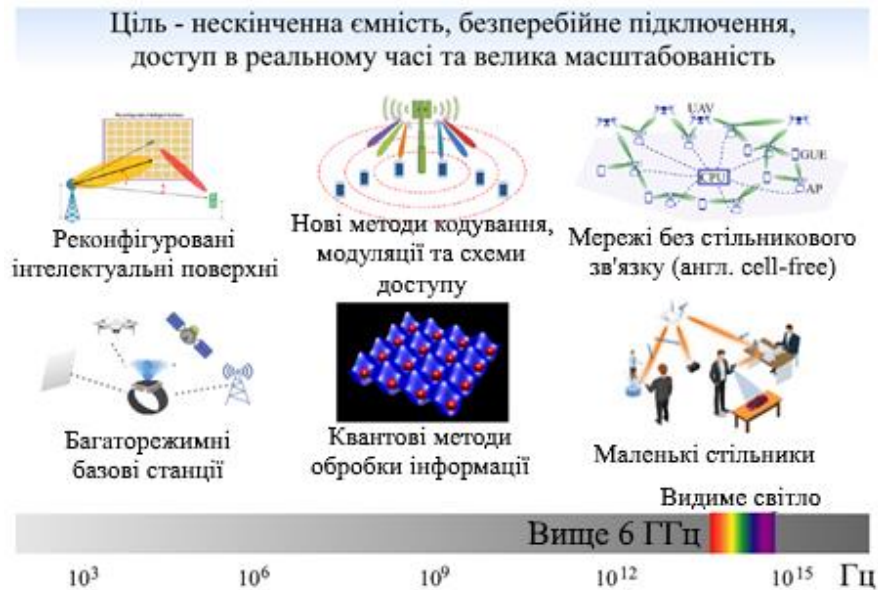


Рис.3. Ключові комунікаційні технології, що пропонуються для майбутніх мереж

Зв'язок з мега-угрупованнями супутників на низькій навколоземній орбіті (LEO) стане одним з нових рубежів зв'язку на шляху до 6G, доповнюючи наземні мережі для забезпечення глобального покриття. Проект партнерства третього покоління (3GPP) працює над адаптацією систем 5G для підтримки супутникового зв'язку. Як показано на рис. 4, тісна інтеграція наземних мереж із супутниковим доступом LEO матиме важливе значення для досягнення глобального покриття в епоху 6G [3-7].

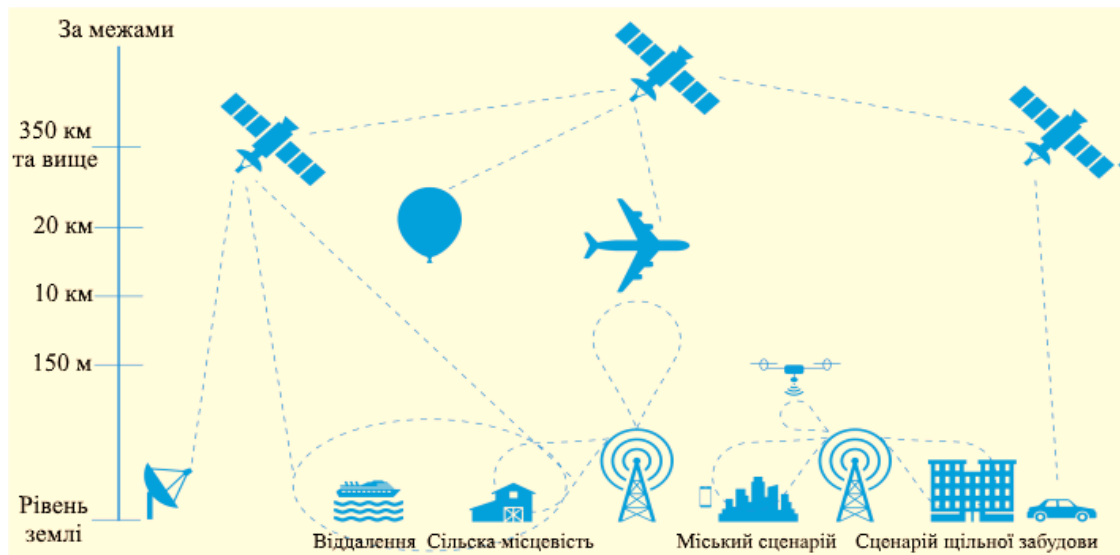


Рис.4. Покриття 6G, що забезпечується щільною інтеграцією наземних мереж із супутниковим доступом LEO

Очікується, що в 2030-х роках з'явиться ще кілька нових ініціатив, таких як мобільні технології 5G та/або шостого покоління (6G). Тоді позиціонування Network2030 має бути уточнене щодо досягнень мобільного зв'язку. Network2030 – це технологія, що пов'язана з фіксованою мережею. Вона потребуватиме більш комплексного погляду на майбутню еволюцію мережі, з оглядом на програми та послуги, актуальні в даний період часу та за його межами.

### **Висновок**

Як видно з аналізу, соціальні та технологічні тенденції, передбачені для майбутніх технологій FG-NET-2030, наголошують на обмеження існуючих мереж мобільного зв'язку 5G. У зв'язку з неоднорідними вимогами гіперпідключень у всесвітньому охопленні до 2030 року, нові мережеві технології покликані полегшити появу нових додатків.

Цим додаткам потрібні мережі 6G для забезпечення екстремальних швидкостей передачі даних, надзвичайно низьких затримок, виняткової надійності та доступності, величезної масштабованості, екстремальної енергоефективності та надзвичайної

мобільності. Реалізація цього бачення 6G вимагає використання нових технологій, які, як передбачається, діятимуть як засоби реалізації 6G.

1. The Focus Group Network 2030 welcomes you to join and participate.  
<https://itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Pages/default.aspx>.

2. W. Saad, M. Bennis, and M. Chen / A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems // IEEE network, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2019.

3. <https://www.globaltimes.cn/content/1209400.shtml>.

4. Babich F., Comisso M., Cuttin A., Marchese M., and Patrone F. Nanosatellite-5G Integration in the Millimeter Wave Domain: A Full Top-Down Approach // IEEE Transactions on Mobile Computing. – Vol. 19, – Feb 2020. P. – 390–404.

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

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

7. Kremenetskaya Y. Features of millimeter-wave ultra-wideband signals application in telecommunications / Y. Kremenetskaya, S. Markov, S. Morozova // The IEEE 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-18). Ukraine, Kyiv, sept. 4-7, - 2018, pp. 310-313

### **Автори статті**

**Кременецька Яна Адольфівна** – доктор технічних наук, професор кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Сивик Олександр Степанович** – магістр, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Олійник Наталія Олександрівна** – магістр, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Сподарцев Ілля Миколайович** – магістр, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Сидоренко Олексій Вадимович** – магістр, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Яковець Всеволод Петрович** – магістр, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

#### **Authors of the article**

**Kremenetska Yana Adolfivna** - sciences doctor (technic), professor of mobile and videoinformation technologies department, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine

**Syvuk Oleksandr Stepanovich** – master, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Oliinyk Natalia Olexandrovna** – master, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Spodartsev Illia Mykolayovych** – master, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Sydorenko Oleksii Vadymovych** – master, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Yakovets Vsevolod Petrovych** – master, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.

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

Аннотация. Неназемные технологии связи становятся ключевым компонентом для развития будущих сетей 6-го поколения (6G). Потенциальные возможности, перспективы реализации, проблемы и их решения для неназемных телекоммуникаций остаются открытыми направлениями для будущих исследований. В статье рассматривается использование миллиметрового и оптического диапазона волн в различных конфигурациях многоуровневой космической связи с использованием низкоорбитальных спутников, стратосферных платформ и беспилотных ретрансляторов. Проведено сравнение емкости канала Шеннона для различных многоуровневых сценариев спутниковой линии связи. Проанализированы направления исследований для обеспечения непрерывности связи, адаптации к погодным условиям, достижения пропускной способности до 100 Гбит/с.

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

## I. Вступ

Поширення інтелектуальних пристроїв та безпроводових додатків з вимогою до збільшення якості передачі призводять до необхідності розширення радіочастотної робочої смуги. Поки рішенням для розгортання мереж наступних поколінь в містах є ущільнення стільникових вузлів з транзитними волоконно-оптичними з'єднаннями високої пропускної здатності. Однак розгортання мереж в малонаселених районах і на великих відстанях з високою пропускною спроможністю залишається проблемою. На сьогодні найбільш продуктивними по пропускній здатності є волоконно-оптичні

системи, для яких граничні експериментальні швидкості складають сотні Тбіт/с, але ще не дозволяють в глобальному масштабі реалізувати якість технологій 5G і наступних поколінь. Можливим вирішенням цієї проблеми є багаторівнева система зв'язку, яка об'єднує наземні та неназемні системи телекомунікацій. Завдяки технічному прогресу в області супутникових технологій реалізуються на дані момент проекти низькоорбітальних систем (LEO). Kuiper від Amazon, Starlink від SpaceX і OneWeb - це три з основних проектів угруповань супутників LEO наступного покоління, які в даний час розробляються, і всі вони обіцяють забезпечити високошвидкісне широкопasmове з'єднання з малою затримкою по всьому світу. В нових проектах LEO передбачається застосування міліметрового діапазону (ММД) та оптичного діапазону(ОД) [1-5]. Можливість підключення до супутникової мережі може бути поліпшена за рахунок використання каналів зв'язку в ММД і ОД між супутниками. Це призведе до збільшення пропускної здатності телекомунікаційних систем, а також можливості ретрансляції даних з супутника спостереження Землі на землю через супутник-ретранслятор GEO, що забезпечує потік даних в реальному часі і зводить до мінімуму кількість наземних станцій, необхідних для надання послуг в системі. Використання ОД і ММД в космосі має ще більший потенціал у порівнянні з наземними системами, так як відсутність фізичної середовища поглинання сигналу дозволить отримати високу швидкість передачі інформації. В даний час основний упор робиться на використанні лазерного зв'язку для зв'язку Землі і супутників Землі. Волоконно-оптичні та оптоелектронні технології також розглядаються ефективним рішенням для реалізації міліметрових технологій зв'язку, а також у формування гібридними оптоелектронними (фотонними) методами спрямованого випромінювання в фазованих антенних решітках. Методи конвертації міліметрового радіочастотного діапазону в оптичний діапазон є перспективним способом збільшення пропускної здатності гібридних волоконно-ефірних наземних систем зв'язку [6-8].

Тому з'явилися напрями досліджень в області об'єднання гетерогенних технологій, включаючи наземні безпроводові, волоконно-оптичні та неназемні (супутникові, стратосферні, безпілотні) системи зв'язку. Об'єднання таких технологій із використанням міліметрового діапазону хвиль може забезпечити високу пропускну здатність і широкий географічний обхват, незважаючи на дуже великі відстані передачі і сильне загасання на цих частотах. Також дослідникам стало зрозуміло, що для реалізації супутникового інтернету необхідно створення повністю інтегрованих неназемних і наземних мереж. Тому буде доцільним проаналізувати можливі варіанти архітектури таких багаторівневих в фізичному плані телекомунікаційних систем, визначити технологічні та фізичні обмеження за площею покриття, пропускну здатністю, іншими параметрами та можливостями.

## **II. Багаторівнева система зв'язку між наземним і не наземними сегментами**

Ідеї створення багаторівневих систем зв'язку між наземним і не наземними сегментами з'явилися завдяки технічному прогресу в області створення повітряних і космічних мініатюрних супутникових платформ, що можуть працювати аналогічно наземним базових станцій. До неназемних платформ відносять наступні системи (рис. 1):

- Космічні супутники зв'язку, що за висотою орбіти поділяються на низькоорбітальні LEO, середньовисотні (MEO) та геостаціонарні (GEO).
- Стратосферні платформи HAPs (High Altitude Platform), розташовані на висоті 18-25 км (за особливістю атмосфери на цих висотах майже постійна температура та відсутні вітри). Можуть покривати відстані сотні кілометрів, працювати протягом тривалого часу, але вони також можуть повернутися на землю для реконфігурації. Затримка поширення сигналу 50-85 с значно нижче в порівнянні з GEO (120 мс), MEO (15-85 мс) і навіть LEO (1.5-3 мс). Стратосферні платформи можуть містити функції Mobile Edge Cloud (MEC), щоб пропонувати наземним терміналам додаткові

обчислювальні можливості та можливості зберігання, тим самим розширюючи охоплення в сторону 3D.

- Нізьковисотні платформи (LAPs) або безпілотні літальні апарати (БПЛА, англ. Unmanned Aerial LAP Vehicle, UAV), до ні відносять також як прив'язні повітряні кулі. Прогнозується, що БПЛА стануть важливим компонентом для розгортання бездротових мереж в найближчому майбутньому.

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

Така архітектура мережі з використанням програмного керування може забезпечити адаптацію з розподілу частотних ресурсів, потужності і спрямованості



антен, швидке реагування на зміну трафіку і динаміку навантаження.

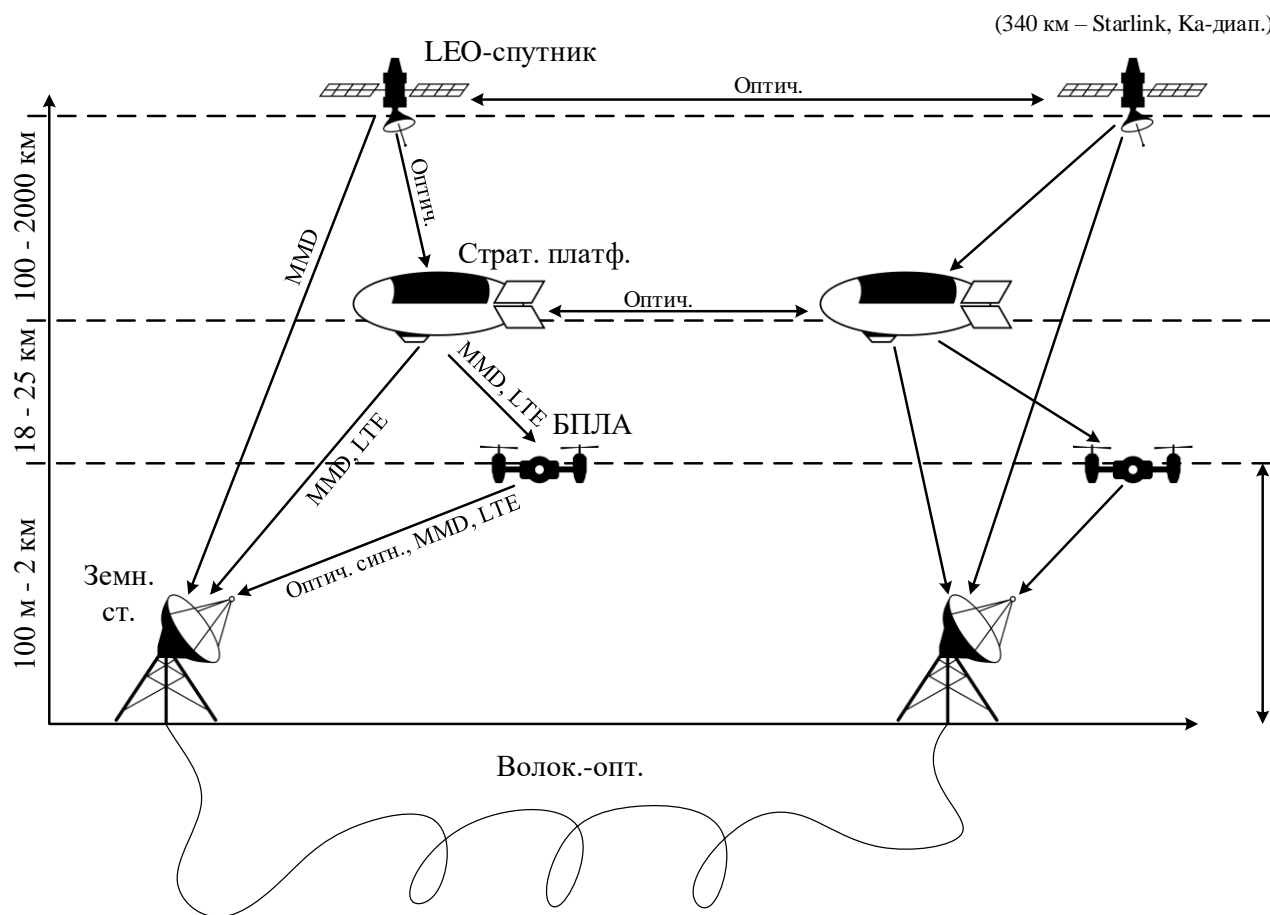


Рис.1 Архітектура багаторівневого космічного зв'язку з використанням низькоорбітальних супутників, стратосферних платформ та безпілотних ретрансляторів.

### III. Застосування оптичного та радіочастотного спектру в багаторівневій структурі мережі

Ключовими рішенням для підвищення продуктивності безпроводових телекомунікаційних мереж може бути застосування ММД та ОД хвиль, які дозволяють організувати канали передачі з шириною в кілька гігагерц, а пропускна здатність відповідає ширині каналу. Для мобільних систем 5 G рішенням збільшення пропускної спроможності є зменшення розміру стільників і збільшення, відповідно, щільності базових станцій. Діапазон 60 ГГц, де спостерігається сильне поглинання в атмосфері, розглядається як варіант для організації мікростільників, так як природне поглинання обмежує розмір стільників і таким чином підвищує спектральну

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

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

Закономірності поширення хвиль ММД та ОД в атмосфері, в космосі, інших середовищах, в міських сценаріях ще вивчаються. Принципи моделювання каналів в міліметровому діапазоні відрізняються від моделей в інших більш низькочастотних радіодіапазонах, наприклад, 800 МГц-5 ГГц. Основними особливостями розповсюдження хвиль є слабке посилення за рахунок дифракції, поширення в області прямої видимості, поглинання в атмосфері (рис. 2), особливо в вікнах поглинання атмосфери. В області 100 ГГц досліджуються явища перевипромінювання в атмосфері [9].

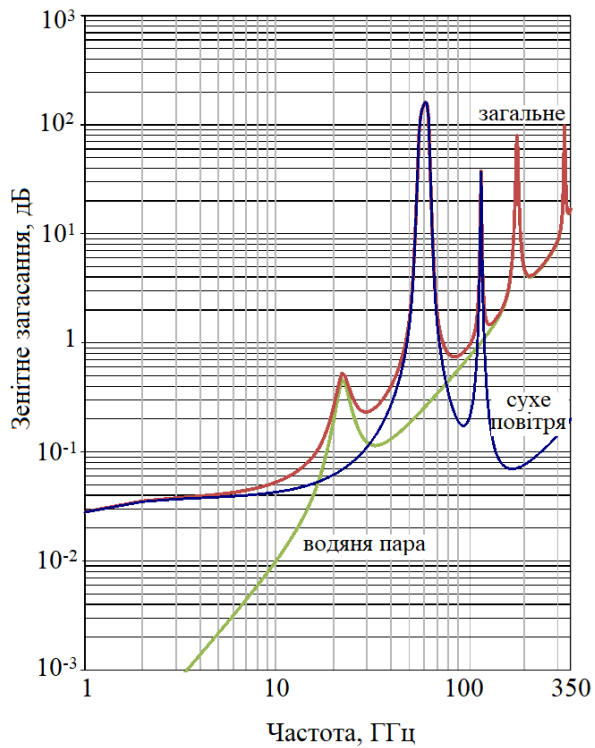


Рис. 2. Загальна зенітне загасання, загасання в сухому повітрі і водяній парі (тиск = 1013,25 гПа; температура = 15 ° С; щільність водяної пари = 7,5 г/м<sup>3</sup>)

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

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

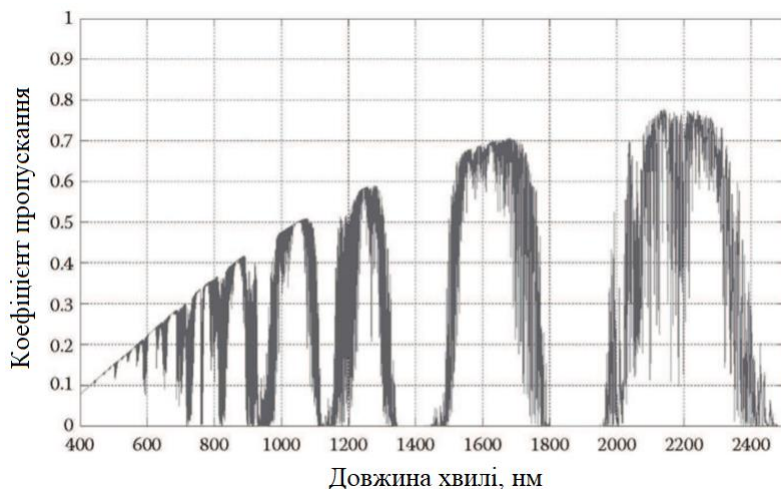


Рис. 3. Коефіцієнт пропускання атмосфери в залежності від довжини хвилі

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

Для високих радіочастот ММД спостерігається різні нелінійні спотворення сигналу, які пов'язані з неоднорідністю атмосфери, а в основному з нелінійними характеристиками приймально-передавального обладнання. Тому складні багаторівневі методи обробки інформаційних сигналів, що застосовуються, наприклад, у дециметровому діапазоні для підвищення пропускну здатності, не можуть бути застосовні до безпроводових систем в ММД і ОД, особливо на великих відстанях. В даний час розробляються нові форми сигналів форм сигналів і схем модуляції, кодування в ММД и ОД. Так найбільш перспективними для уникнення нелінійних спотворення сигналу розглядаються імпульсні надширокосмугові методи модуляції, просторове багатопроменеве мультиплексування, методи когнітивного спектру (англ. Software defined radio, SDR).

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

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

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

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

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

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

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

Сигнал в радіоканалі між наземною і супутниковою станціями піддається кількома стадіями загасання. Поширення сигналу може здійснюватися в межах прямої видимості (англ. LOS, Line of Sight) або поза прямої видимості (англ. NLOS, Non Line

of Sight) з ймовірністю, яка залежить від навколишнього середовища (наприклад, міський чи сільський сценарій) і кута елевації  $\alpha$  супутника. Модель розрахунку втрат (PL) в космічному радіоканалі за рекомендаціями 3GPP [12] складається з наступних елементів:

$$PL[\text{dBm}] = PL_e + PL_b + PL_g + PL_s. \quad (3)$$

де  $PL_e$  – втрати на вході в будівлю,  $PL_b$  – основні втрати на трасі,  $PL_g$  – загасання через атмосферні гази та  $PL_s$  – загасання сигналу через іоносферних або тропосферних мерехтінь.

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

$$PL_e(p) = 10 \log_{10}(10^{0.1A} + 10^{0.1B} + 10^{0.1C}), \quad (4)$$

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

Attenuation due to atmospheric gases  $PL_g$  is described as a function of carrier frequency  $f_c$ , placement angle  $\alpha$ , satellite orbital altitude  $h$ , and water vapor density (i.e., absolute humidity). In particular, the  $PL_g$  parameter is calculated as:

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

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

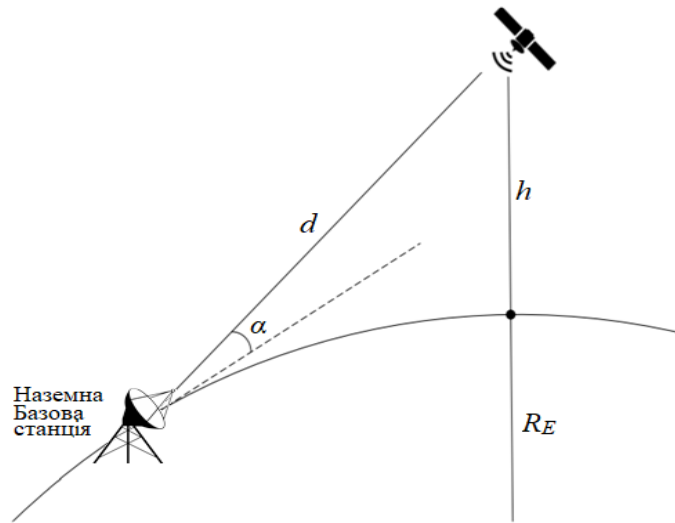


Рис. 4. Концепція передачі сигналу між супутником і наземною станцією ( $BS_E$ ),  $R_E$  - радіус Землі,  $h$  – висота орбіти супутника, кута елевації,  $d$  – відстань між супутником та наземною станцією

В рекомендації ITU-R P.676 [13] представлена відповідна залежність  $A_{zenith}(f_c)$  для несучих частот від 1 до 350 ГГц (рис. 2), з якої видно, що в нормальних атмосферних умовах  $A_{zenith}(f_c)$  нижче 10 дБ. На гідрометеорах загасання сигналу обчислює також різними функціями і параметрами для наземних і супутникових систем.

Слід зазначити, що для супутникових ліній зв'язку найбільший вплив на ослаблення сигналу надають найбільш нижні шари атмосфери до 2км.

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

$$PL_s(f_c) = \frac{27.5 \cdot S_4^{1.26} \cdot (f_c/4)^{-1.5}}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

$S_4$  - індекс мерехтінь амплітуди [11] і залежить від широти. На низьких широтах (між  $\pm 20^\circ$ , тобто в екваторіальних областях) мерехтіння виникає через великі обсяги збідненої іонізації, створюваної конвективними плазмовими процесами, відповідно  $S_4 = 0 \div 4$ . На високих широтах (вище  $\pm 60^\circ$ ) мерехтіння в основному походить від краю зовнішнього пояса Ван-Аллена, відповідно  $S_4 = 0 \div 7$ . Вплив тропосферних мерехтінь в 3GPP характеризується як функція  $PL(f_c, \alpha)$ , на відміну від іоносферних мерехтінь, збільшується зі збільшенням частоти несучої сигналу, особливо на частотах вище 10 ГГц. У цьому випадку коливання сигналу викликані раптовими змінами показника заломлення через зміни температури, вмісту водяної пари і барометричного тиску.

Значення  $PL_b$  у формулі (3) визначають відповідно до Стандарт 3GPP TR38.901 [12] втрати у вільному просторі (англ. FSPL, Free Space Propagation), тіньовий загасання (англ. SF, ShadowFading) і втрати через перешкоди (англ. CL, ClutterLoss), пов'язані з перевідбиттям сигналу від перешкод, і виражаються як:

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

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

$$FSPL(d, f_c) = 32.45 + 20 \log_{10}(f_c) + 20 \log_{10}(d), \quad (8)$$

Закономірності поширення радіохвиль ММД мають принципові відмінності від поширення в діапазонах, в яких працюють сучасні системи зв'язку 3G і 4G. Розсіювання сигналу ММД відбувається при відбитті від шорсткуватих бетонних поверхонь будівель, при проходженні радіохвилі ММД через крони дерев і т.і. Побудова емпіричних моделей засновано на пошуку функції, що апроксимує вимірювання, проведені в деякій досліджуваній області. Так, еталонним підходом є використання моделі поширення Фрііса, в якій використовується емпіричне співвідношення  $D\lambda^2 = 4\pi A_{\text{eff}}$ , яке вірно для вузькосмугових систем [14].  $D_{\text{TX}}(\theta)$ –



коефіцієнт спрямованої дії антени,  $\theta$  – кут розкриття антени,  $A_{RX}$  – ефективна площа приймальної антени ( $A_{RX} = KA_{phys}$ ,  $0 < K < 1$ ,  $A_{phys}$  – фізична площа антени). Із зменшенням довжини хвилі зростає спрямованість антен, так для фазованих антенних решіток кутова ширина променя відповідає  $\theta \approx \sqrt{\lambda/Nb}$  [15], де  $N$  – кількість випромінюючих елементів,  $b$  – відстань між цими елементами.

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

У даній статті пропонується квазіоптичного модель, в якій враховуються втрати сигналу, пов'язані з просторовим розбіжністю сигналу:

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

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

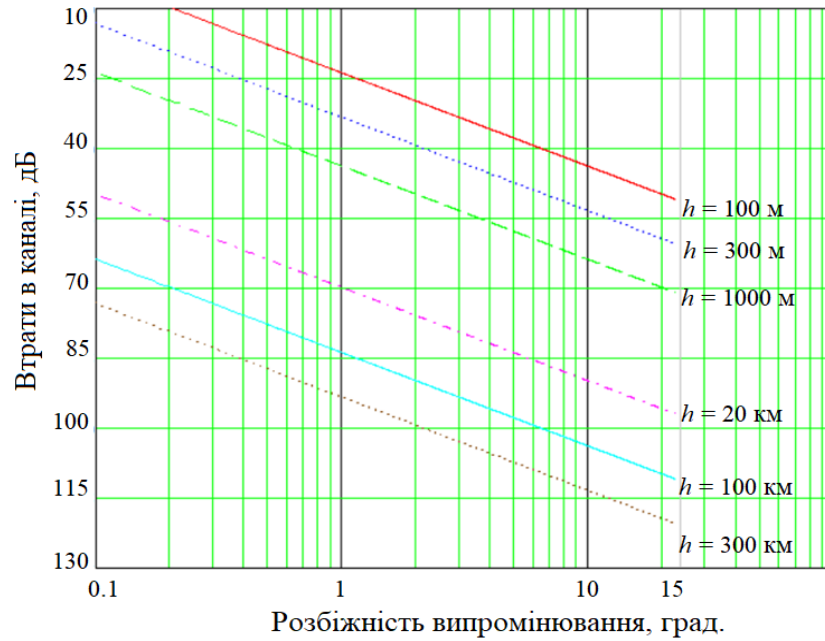


Рис. 5. Залежність кута розкриття антени і втрат потужності сигналу, пов'язаних з розбіжністю випромінювання для різних висот  $h$  розташування супутника

Використовуючи (3) та (9) можна отримати:

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

В (10)  $d$  виражається в метрах як функція радіуса Землі  $R_E$ , висоти орбіти супутника  $h$  і кутового розташування супутника (кута елевації)  $\alpha$  (рис.4), тому:

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

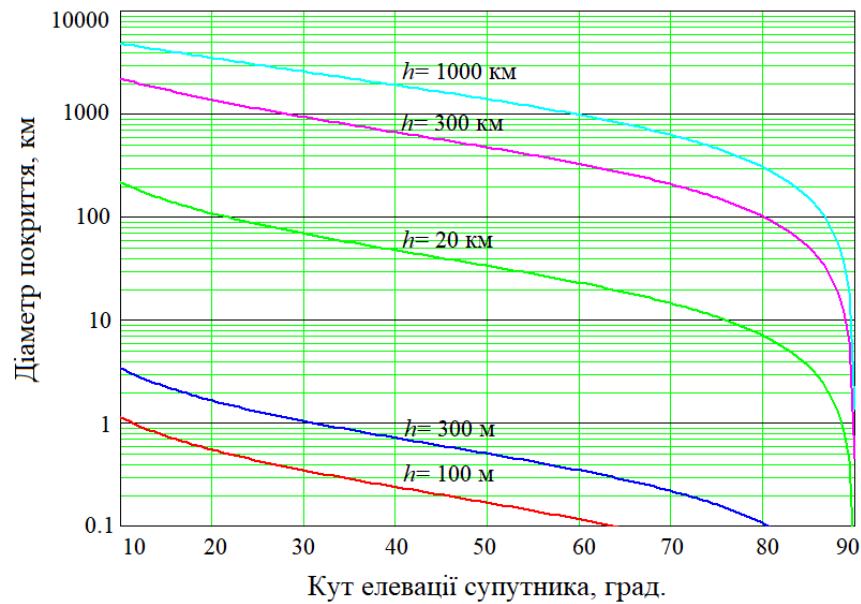


Рис. 6. Залежність кута елевації (місця) супутника від діаметра покриття без урахування рефракції

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

Для оцінки взаємозв'язаних величин спектральної, енергетичної ємності, пропускної спроможності зазвичай за основу береться рівняння Шеннона.

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

де співвідношення сигнал/шум  $SNR$  визначається у відповідності із (2) як  $SNR = P_{RX} / (N_{int} + N_{TX} + N_{RX})$ .

Припускаємо, що якщо співвідношення  $SNR$  нижче попередньо визначеного порога 0 дБ, то зв'язок Земля-супутник не може бути встановлена і в цьому випадку ми встановлюємо пропускну здатність Шеннона рівною 0.

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

збільшити за рахунок використання частотних ресурсів ММД і ОД, які також пов'язані з посиленням спрямованості ( $> 50$  дБ, що типово для сучасних супутникових антенних технологій). Розбіжність пучка світла сучасного лазера може досягати 10 мкрад. Також відомо, що для високочастотних технологій з зростанням потужності передавача зростає потужність шуму. Ця тема аналізується, наприклад в роботах [6-8], і має велику інформаційну та обчислювальну ємність. У даній роботі це питання не аналізується.

## **V. Порівняння за ефективністю різних конфігурацій багаторівневої супутникової системи зв'язку між наземним і не наземними сегментами**

Особливості структури атмосфери і переваги супутникових технологій дозволяють застосовувати багаторівневі висотні моделі, за допомогою яких можна збільшити пропускну здатність. Можливості підвищення продуктивності за допомогою багаторівневих висотних систем зв'язку базуються на таких факторах:

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

- в стратосферних платформах і БПЛА передбачається посилення потужності сигналу за рахунок використання сонячної енергії, збільшення спрямованості (підсилення) антени, використання технології МІМО;

- космічна (бортова) станція може виробляти: фільтрацію і перетворення радіочастот, демодуляція/декодування, перемикування/маршрутизацію, кодування /модуляцію.

Середня пропускну здатність відкритих наземних оптичних систем 2 Гбіт/с. Однак із вдосконаленням методів оптоелектронної обробки сигналів швидкість передачі може зрости до сотні (і більше) Гбіт/с.

Розглянемо спадний канал від супутника до земної станції. Параметри для моделювання пропусковий здатності Шеннона предсталвени в Табл.1.

Таблица 1.

Параметри моделювання.

Параметр	Значение				
Угол возвышения (элевации) спутника, град	10, . . . , 90 град				
Высота LEO спутника НAPs БПЛА	2000 - 300 км				
	20 км				
	1 км – 100 м				
Несущая частота $f_c$	2 ГГц	6 ГГц	28 ГГц	70 ГГц	0.36 PHz
Ширина канала $B$	200 МГц	500 МГц	1 ГГц	3 ГГц	100 ГГц
Угол раскрыва антенны(ширина луча)	5 град	3 град	0,5 град	0,3 град	$6.7 \times 10^{-4}$ град
Мощность передатчика ММД	33 дБм				
Площадь апертуры приемной антенны наземной базовой станции	3 м <sup>2</sup>	3 м <sup>2</sup>	1,5 м <sup>2</sup>	1,5 м <sup>2</sup>	0,2 м <sup>2</sup>
Площадь апертуры приемной антенны спутника НAPs, БПЛА	0.5-1 м <sup>2</sup>	0.5-1 м <sup>2</sup>	0.5-1 м <sup>2</sup>	0.5-1 м <sup>2</sup>	0,2 м <sup>2</sup>
Порог отношения сигнал / шум	0 дБ				
Метод модуляции сигнала	ООК, РРМ				
Расстояние между наземной базовой станцией( $BS_E$ ) и пользователем для городского сценария	200 м, 100 м				
Широта	35°				
Радиус Земли $R_E$	6371 км				
Температура $T$	288,15 К				
Концентрация водяного пара	7,5 г/м <sup>3</sup>				
Давление воздух;	1013,25 гПа				
Варианты разбивки трассы на сегменты	1 сегмент(1000 км, 300 км): Спутник-Земля станция 2 ГГц, 6ГГц, 28 ГГц, 70 ГГц,				
	2 сегмента: Спутник(300 км) –НAPs(20 км)-Земля				
	3 сегмента: Спутник(300 км)-НAPs(20 км)- LAPs(100 м)-Земля				
	4 сегмента: Спутник-НAPs-LAPs(2 км) – LAPs(100 м)- Земля				

Оптический космичний зв'язок на лініях Земля-супутник і між супутниками вже давно успішно використовується [16-18]. Сучасні досягнення в галузі космічних технологій та фотонних технологій відкривають нову главу для оптичної космічного

зв'язку. Пропускання здатність оптичного каналу сприяє зменшенню часу затримки сигналу і підтримки режиму в реальному часі, що необхідно для багатьох важливих додатків. Але не дивлячись на великий потенціал FSO-зв'язку (free-space optics), її продуктивність обмежена побічними ефектами (а саме, поглинанням, розсіюванням і турбулентністю) атмосферного каналу, які роблять канал випадковою функцією простору і часу.

З цієї причини в FSO необхідно відстеження і дуже точне наведення оптичного випромінювання до одержувача. Для системи FSO при ясних погодних умовах видимість може мати значення більше 10 миль.

Експериментальні результати [19] продемонстрували для низхідного каналу зв'язку супутник-Земля FSO пропускну здатність до 1,25 Гбіт/с, а також і для НАР-НАР до 10 Гбіт/с. Передбачається, що з удосконаленням схем модуляції, пропускну здатність безпроводової мережі FSO може бути збільшена навіть до 100 Гбіт/с. Споживана потужність бортових антен супутників становить, як передбачається від 0,5 до 5 Вт в залежності від швидкості передачі даних на відстань до декількох 1000 км [19]. Системи MIMO FSO можуть також значно збільшити продуктивність.

На рис. 7-9 представлені розрахунки інформаційної ємності Шеннона для багаторівневих по висоті розташування супутників (НАР, UAV).

Проміжний НАР (UAV) забезпечує підвищену пропускну здатність за рахунок посилення сигналу від висхідного супутника перед його пересиланням на землю, забезпечуючи при цьому більш швидке розгортання і менші витрати в порівнянні з космічними станціями. На рис.7-9 також наводиться порівняльна уявлення роботи багаторівневих систем у вікнах прозорості атмосфери 28-52 ГГц, 70-80 ГГц і в ОД.

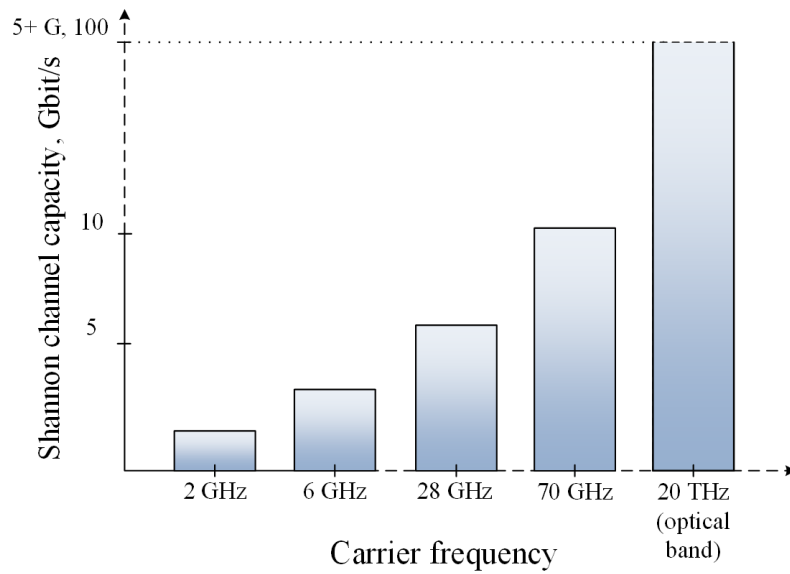


Рис. 7. Порівняльне уявлення ємності каналу Шеннона для супутникової лінії LEO-Земля на різних радіо- та оптичному діапазонах

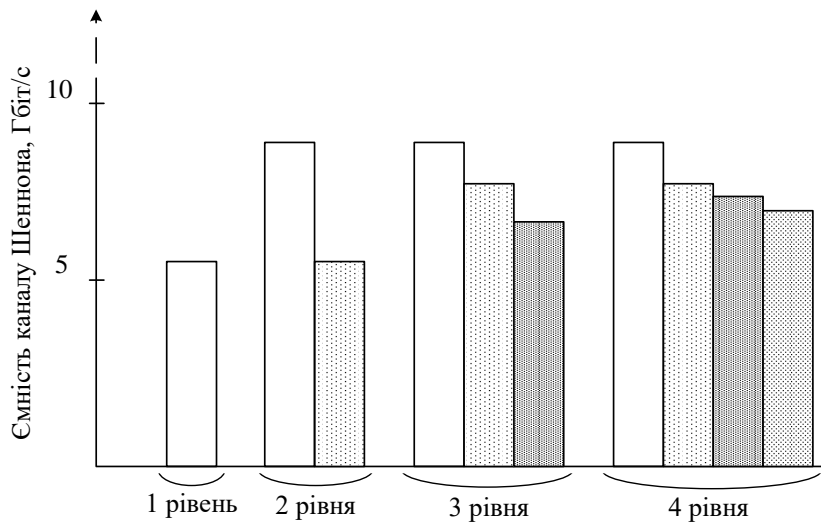


Рис. 8. Порівняльне уявлення ємності каналу Шеннона для багаторівневого сценарію супутникової лінії зв'язку, що працює в діапазоні 28 ГГц: 1 рівень LEO-BS<sub>E</sub>, (земна базова станія), 2 рівня LEO-HAP-BS<sub>E</sub>, 3 рівня LEO-HAP-UAV-BS<sub>E</sub>, 4 рівня LEO-HAP-UAV1(1 км)-UAV2(100 м)-BS<sub>E</sub>

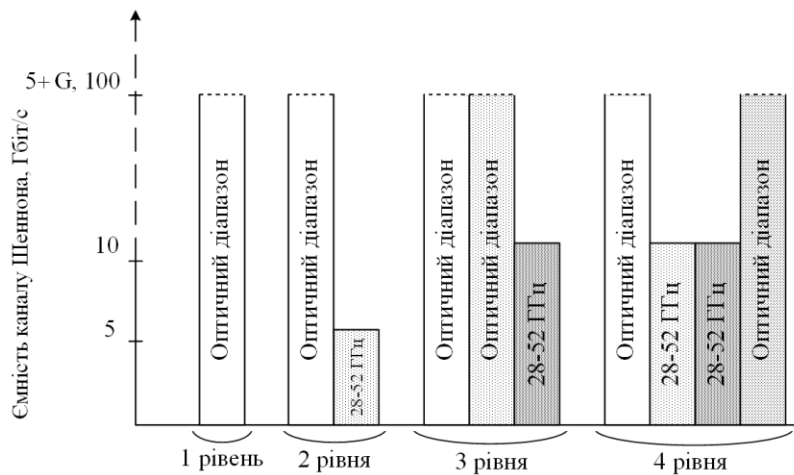


Рис. 9. Порівняльне уявлення ємності каналу Шеннона для багаторівневого сценарію супутникової лінії зв'язку: 1 рівень LEO-BS<sub>E</sub>, (земна базова станія), 2 рівня LEO-HAP-BS<sub>E</sub>, 3 рівня LEO-HAP- UAV-BS<sub>E</sub>, 4 рівня LEO-HAP- UAV1(1 км)- UAV2(100 м)-BS<sub>E</sub> на різних радіо- та оптичному діапазонах

## VI. Обговорення результатів

Безпроводовий зв'язок в ММД і ОД має великий потенціал для використання в космічних системах зв'язку. Дані технології мають переваги використання в азимутальних каналах прямої видимості, в порівнянні з наземними. Так, наприклад, повне зенітне загасання може бути набагато менше погонного в нижніх шарах атмосфери. А також має переваги по віртуальності реконфігурації, площею покриття і енергетичної (спектральної) ефективністю. Раптове падіння якості зв'язку через атмосферних явищ, включаючи сильну атмосферну турбулентність, призводить до необхідності адаптивного динамічного керування променем, яке також призводить до зниження використання ресурсів, як частотних так і енергетичних. Бездротові і волоконні оптичні системи зв'язку мають схожість по робочому діапазону хвиль, методам обробки. Методи радіофотоніки можуть бути застосовані і для бездротових систем зв'язку, де може бути використана технологія конвертації радіохвиль в оптичний, включаючи терагерцовий діапазон.



Гібридне використання ММД і ОД в системах космічного зв'язку, багаторівневої конфігурації розташування супутникових ретрасляторів, включаючи НАР і UAV, волоконно-оптичні лінії, просунутих методів обробки сигналів можуть забезпечити високошвидкісну зв'язок в практично в будь-яку погоду в будь-якій точці Землі. Реалізація високошвидкісних радіоліній багато в чому пов'язані з досягненнями області фотоніки. Наприклад, оптоелектронні методи формування випромінювання в фазованих антенних решітках, використання перспективних форматів модуляції, таких як КАМ високого порядку, імпульсних методів модуляції оптичного сигналу з поляризаційними ефектами, технологій МІМО ФАР, методів спостереження.

## **VII. Висновки**

Неназемні мережі досліджуються як ключовий компонент структури 6G для підтримки глобального, повсюдного і безперервного підключення, а також для подолання обмежень покриття розгорнутих мереж 5G.

Пропозиції в роботі система багаторівневої інтегрованої архітектура космічного зв'язку може бути розглянута для мереж 5G+. Спільне використання радіо і оптичного спектру, рухомий архітектри мережі з ретрансляторами на різних висотах для адаптації погодних умов, необхідної пропускнує спроможності і т.д. сприяє підвищенню пропускнує здатності в сотні гігабіт на секунду. В рамках майбутніх робіт необхідно об'єднати принципи, параметри земних і неназемні телекомунікацій, методи модуляції/мультиплексування, часу затримки і покриття.

1. H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, Firstquarter 2017.

2. M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, March 2020.
3. F. Babich, M. Comisso, A. Cuttin, M. Marchese, and F. Patrone, "Nanosatellite-5G Integration in the Millimeter Wave Domain: A Full Top-Down Approach," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 19, no. 2, pp. 390–404, Feb 2020.
4. M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective," *IEEE Comm. Surve. & Tut.*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014.
5. M. Giordani and M. Zorzi, "Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities," in *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, pp. 244-251, Mar. 2021.
6. J. Yu, X. Li, W. Zhou, "Tutorial: Broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication", *APL Photon.*, vol. 3, no. 11, 2018.
7. S. Jia et al., "THz photonic wireless links with 16-QAM modulation in the 375-450 GHz band", *Opt. Express*, vol. 24, no. 21, pp. 23777-23783, 2016.
8. V. J. Urick, C. S. Sunderman, J. F. Diehl, N. D. Peterson, *W-band technology and techniques for analog millimeter-wave photonics*, Naval Res. Lab., Washington, DC, USA, Aug. 2015/
9. V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov, J. M. Jornet, Y. Koucheryavy, "Interference and SINR in millimeter wave and terahertz communication systems with blocking and directional antennas", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1791-1808, Mar. 2017.
10. <https://eandt.theiet.org/content/articles/2020/11/starlink-launches-60-more-satellites-but-commercial-service-faces-delays/>
11. Физические аспекты моделирования радиоканала и шумов в миллиметровом диапазоне / Я. А. Кременецкая, Е. Р. Жукова, Н. В. Градобоева, Д. А. Любас, Б. В. Саенко // Телекоммуникаційні та інформаційні технології. - 2018. - № 2. - С. 60-71.
12. 3GPP, "Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN)," TR 38.821 (Release 16), 2020.
13. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf)
14. М.П. Долуханов, Распространение радиоволн. Учебник для вузов. М. Связь, 1972.
15. Р.С. Хансен, *Фазированные антенные решетки*, 2-е издание. М.: Техносфера, 2012.
- 16 T. Aruga, K. Araki, T. Igarashi, F. Imai, Y. Yamamoto, and F. Sakagami, "Earth to space laser beam transmission for spacecraft attitude measurement," *Appl. Opt.*, vol. 23, pp. 114–147, 1984.

- 1.7 T. Aruga, K. Araki, R. Hayashi, T. Iwabuchi, M. Takahashi, and S. Nakamura, "Earth-to-geosynchronous satellite laser beam transmission," *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 1, pp. 53–56, 1985.
18. K. Araki, T. Itabe, M. Takabe, T. Aruga, and H. Inomata, "Experiments on CO<sub>2</sub> laser beam transmission from ground to geostationary meteor
19. H. Kaushal, G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques." *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 19(1): 57-96 (2017)