

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

**на тему: “ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ВОЛОКОННО-ЕФІРНИХ
МЕРЕЖ ІЗ СУМІСНИМ ВИКОРИСТАННЯМ РАДІО- ТА ОПТИЧНОГО
СПЕКТРУ СИГНАЛІВ ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи ТСДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Топчій В.М.

(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 Телекомунікаційних систем та мереж

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Телекомунікаційних систем та мереж

В.Ф. Заїка

“ ”

_____ 2022 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Топчію Владиславу Миколайовичу

1. Тема роботи: “Дослідження інтегрованих волоконно-ефірних мереж із сумісним використанням радіо- та оптичного спектру сигналів”,
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 НАР 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. Інтегрована система зв'язку між наземним і не наземними сегментами.

3. Порівняння ефективності супутникових та волоконно-ефірних систем
5. Графічна частина роботи
представлена на 10 слайдах презентації.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	12.10.21	Викон.
2.	Аналіз тенденцій розвитку мобільного зв'язку	16.10.21	Викон.
3.	Дослідження основних принципів роботи інтегрованих волоконно-ефірних систем	27.10.21	Викон.
4.	Оцінка ефективності застосування інтегрованих волоконно-ефірних мереж із сумісним використанням радіо- та оптичного спектру сигналів	20.11.21	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	12.12.21	Викон.
6.	Розробка презентації	15.12.21	Викон.

Студент

Топчій В.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Кременецька Я.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

“ ”

_____ 202_ року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

по магістерській кваліфікаційній роботі

Студента Топчія Владислава Миколайовича

на тему: “Дослідження інтегрованих волоконно-ефірних мереж із сумісним використанням радіо- та оптичного спектру сигналів”

Актуальність:

Магістерська робота присвячена аналізу технологічних особливостей інтеграції волоконно-ефірних мереж, де використовується спектр радіохвиль ММД та оптичний діапазон. Впровадження гібридних волоконно-ефірних технологій, в яких поєднується провідна волоконно-оптична мережа передачі з радіоканалам, є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності та мобільності мереж. Прогнозується, що розвиток мереж мобільного зв'язку 5G та майбутньої технології 6G будуть засновані на таких технологіях.

Позитивні сторони:

Проведено порівняння продуктивності супутникових, наземних та волоконно-оптичних систем. Показано, що поєднання переваг волоконно-оптичних та радіо-технологій передачі, є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності та мобільності мереж доступу телекомунікаційних систем.

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

Недоліки:

1. В роботі не достатньо проаналізовано критерії обмеження пропускної здатності каналів зв'язку FSO.
2. На стор. 73 в Табл.3.1 недостатньо обґрунтовано наведено технологічні параметри.

Висновки:

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку “**відмінно**”, а студент Топчій Владислав Миколайович - присвоєння кваліфікації “**Магістр з телекомунікацій та радіотехніки**”.

Якість проекту (роботи)		Підпис рецензента	(_____)
Виконано на замовлення підприємства			
Виконано за тематикою НДР			
Виконано з макетом		Підпис	засвідчую
Виконано з застосуванням ЕОМ та МПТ	√		
Має практичну цінність	√	Підпис особи, що засвідчує	(_____)
Проект-частина комплексної теми		М.П.	

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ДЕРЖАВНОЇ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Направляється студент Топчій В.М. до захисту магістерської роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

на тему: Дослідження інтегрованих волоконно-ефірних мереж із сумісним використанням радіо- та оптичного спектру сигналів

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор інституту _____

(підпис)

Кравченко В.І.

(прізвище та ініціали)

Довідка про успішність

Топчій В.М. 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 Топчій Владислав Миколайович показала гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння аналізувати перспективні рішення інтегрованих телекомунікаційних мереж, в яких застосовано волоконно-оптичні та безпроводові технології в міліметровому та оптичному діапазонах, проводити порівняльний аналіз характеристик супутникових, наземних систем, оптичних систем зв'язку, 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 Топчій Владислав Миколайович - 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 _____

Топчій В.М.

(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Державній екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

Телекомунікаційних систем та мереж

(підпис)

Заїка В.Ф.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 72 с., 22 рис., 4 табл., 31 дж.

Об'єкт дослідження – перспективи об'єднання оптичних та радіотехнологій.

Предмет дослідження – аналіз методів інтегрування радіо та оптичних мереж з високою пропускною здатністю.

Мета роботи – аналіз методів волоконно-ефірної інтеграції, порівняння за пропускною здатністю інтегрованих рішень в міліметровому та оптичному діапазонах.

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

У магістерській роботі аналізуються інтегровані волоконно-ефірні технології, в яких поєднується провідна волоконно-оптична мережу передачі з радіоканалам, що є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності та мобільності мереж доступу, а також може знизити вартість мереж доступу. Досліджуються оптоелектронні методи формування та передачі сигналів радіочастотного міліметрового діапазону. Проведено порівняння продуктивності супутникових, наземних та волоконно-оптичних систем. Показано, що поєднання переваг волоконно-оптичних та радіо- технологій передачі, є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності та мобільності мереж доступу телекомунікаційних систем.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ; ІНТЕГРАЦІЯ МЕРЕЖ;
МІЛІМЕТРОВИЙ ДІАПАЗОН; ОПТИЧНИЙ ДІАПАЗОН; ОПТИЧНІ
БЕЗПРОВОДОВІ МЕРЕЖІ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	9
ВСТУП	11
1 ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ	13
1.1. Впровадження нових технологій	13
1.2. Застосування БПЛА	17
1.3. Застосування міліметрового діапазону	17
1.4. Застосування інтегрованого оптичного зв'язку	19
1.5. Багаторівнева система зв'язку між наземним і не наземними сегментами	24
1.6. Переваги та вимоги до застосування інтегрованого оптичного зв'язку	26
1.7. Застосування оптичного та радіочастотного спектру в багаторівневій структурі мережі	28
1.8. Проект HydRON	31
2 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ІНТЕГРОВАНИХ ВОЛОКОННО-ЕФІРНИХ СИСТЕМ	35
2.1 Оптоелектронна обробка радіочастотних сигналів та рішення інтеграції безпроводових та волоконно-оптичних технологій	37
2.2. Схема генерації міліметрового діапазону оптоелектронними методами	40
2.2.1 Лазер із прямою модуляцією (англ. Directly Modulated LaserDML).	40
2.2.2 Зовнішня модуляція	42
2.2.3 Генерація векторних сигналів ММД на основі лазерів з прямою модуляцією.	46
2.2.4 Генерація векторних сигналів на основі зовнішньої модуляції	49

2.4. Розширена багаторівнева модуляція.	57
2.5. Формування поляризаційного мультиплексування в антені.	60
3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ВОЛОКОННО-ЕФІРНИХ МЕРЕЖ ІЗ СУМІСНИМ ВИКОРИСТАННЯМ РАДІО- ТА ОПТИЧНОГО СПЕКТРУ СИГНАЛІВ	63
3.1. Порівняння ефективності супутникових та волоконно-ефірних систем	64
3.2. Супутниковий зв'язок на міліметрових хвилях	68
3.3. Втрати сигналу при переході в приміщення.	68
3.4. Основні втрати на трасі	69
3.5. Атмосферне поглинання.	70
3.6. Порівняння продуктивності супутникових GEO і LEO систем наступного покоління та волоконно-оптичних систем	74
ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	77
ДОДАТОК 1	81

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 – Геостаціонарна навколосемна 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

Сучасний розвиток потокового відео надвисокої чіткості (UHD), а також прогнози у відповідності до документів FG NET-2030, де очікується надання сервісу голографічного зв'язку, тактильного інтернету, потребує збільшення вимог до комунікаційних можливостей та пропускної здатності передачі даних.

Швидке зростання трафіку даних також підвищує попит на широкосмуговий зв'язок. Технологія провідних мереж передачі може забезпечити величезну смугу пропускання користувачів широкосмугового Інтернету. Однак через обмеження, пов'язані з оптичним волокном або кабелем, знижується зручність використання та універсальність продуктів. Використання високошвидкісної безпроводової передачі може позбавити недоліків волокна і значно підвищити рівень комфорту для користувача. Крім того, через прокладку та вартість лінії оператори та користувачі воліють використовувати роумінг-з'єднання. Тому дослідники намагаються об'єднати провідну волоконно-оптичну мережу передачі з технологією радіозв'язку, щоб запропонувати систему інтегрованих волоконно-ефірних мереж.

Технологія волоконно-оптичної передачі може забезпечити величезну смугу пропускання для користувачів широкосмугового Інтернету. Однак, через обмеження практичної реалізації оптичного волокна або кабелю, знижується зручність використання та універсальність продукції. Тому впровадження гібридних волоконно-ефірних технологій, в яких поєднується провідну волоконно-оптичну мережу передачі з радіоканалам, є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності та мобільності мереж доступу, а також може знизити вартість мереж доступу. І сучасні передові технології мобільного зв'язку 5G та майбутні технології 6G засновані на цій технології.

Тому актуальною задачею є аналіз технологічних особливостей інтеграції волоконно-ефірних мереж, де використовується спектр радіохвиль та оптичний діапазон. Дослідити методи та сценарії гібридних волоконно-ефірних технологій, зробити порівняльний аналіз за продуктивністю супутникових, наземних та волоконно-оптичних систем.

1 ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Впровадження нових технологій

Конкретні пристрої, такі як пристрої VR повинні виходити за рамки 5G (B5G), тому що для них потрібна мінімальна швидкість передачі даних 10 Гбіт/с. Отже, коли 5G досягне своїх меж у 2030 році, цілі проектування його наступного кроку вже досліджуються у літературі.

Нові елементи, для яких може знадобитися система шостого покоління (6G), включають: (i) масивні людино-машинні інтерфейси; (ii) повсюдні обчислення між локальними пристроями та хмарою; реальний досвід та (iv) точність відчуттів та дій для управління фізичним світом [9]. Щоб досягти мети 6G та подолати обмеження 5G для підтримки нових завдань, бездротові системи B5G мають бути розроблені із новими привабливими функціями. Комунікаційні мережі 6G будуть відповідати відставанням системи 5G за рахунок впровадження нового синтезу майбутніх послуг, таких як інтелектуальне зондування навколишнього середовища та нові взаємодії людини та людини та людини з машиною, повсюдне впровадження та впровадження нових технологій, таких як терагерцовий (ТГц) діапазон, тривимірні (3D) мережі, квантовий зв'язок, голографічне формування променя, зв'язок зворотного розсіювання, інтелектуальна поверхня, що відбиває (IRS) і попереджувальне керування. Ключовими драйверами 6G буде конвергенція всіх минулих функцій, таких як ущільнення мережі, висока пропускна здатність, висока надійність, низьке споживання енергії та широкі можливості підключення. Система 6G також продовжить тенденції попередніх поколінь, яке включає нові послуги із додаванням нових технологій. Нові послуги включають штучний інтелект, інтелектуальні пристрої, що носяться, імплантати, автономні транспортні засоби,

пристрої обчислювальної реальності, зондування і тривимірне картографування. Найбільш важливою вимогою до бездротових мереж 6G є здатність обробляти величезні обсяги даних та можливість підключення з дуже високою швидкістю передачі даних на кожен пристрій.

Парадигма 5G отримає подальший розвиток та розширення в 6G. Проте, система 6G підвищить продуктивність та підвищить якість обслуговування користувачів у кілька разів більше, ніж 5G, поряд із деякими цікавими функціями. Він може захистити систему, убезпечити дані користувачів та надати зручні послуги. Очікується, що система зв'язку 6G стане глобальним засобом зв'язку. Передбачається, що швидкість передачі даних на користувача в 6G у багатьох випадках складатиме приблизно 1 Тбіт/с. Очікується, що система 6G забезпечить одночасне бездротове з'єднання у 1000 разів вище, ніж 5G. Більше того, також очікується зв'язок на наддалеких відстанях із затримкою менше 1 мс. Найбільш захоплююча особливість 6G - це включення, що повністю підтримується, для управління автономними системами. Трафік відео, ймовірно, буде домінуючим серед різних систем трафіку даних через 6G. Найбільш важливими технологіями, які стануть рушійною силою для 6G, є діапазон ТГц, оптичний бездротовий зв'язок (OWC), волоконно-оптичні мережі, 3D-мережі, безпілотні літальні апарати (БПЛА), IRS та бездротова передача енергії.

Перспективи і застосування. Усі мережеві інструменти, управління, обробка сигналів фізично, управління ресурсами, зв'язок основі послуг тощо, будуть включені в повністю інтегровані системи зв'язку 6G. Це сприятиме революції Індустрії, тобто цифрової трансформації промислового виробництва. На рис. 1.1 показаний сценарій архітектури зв'язку, що передбачає створення систем зв'язку 6G.

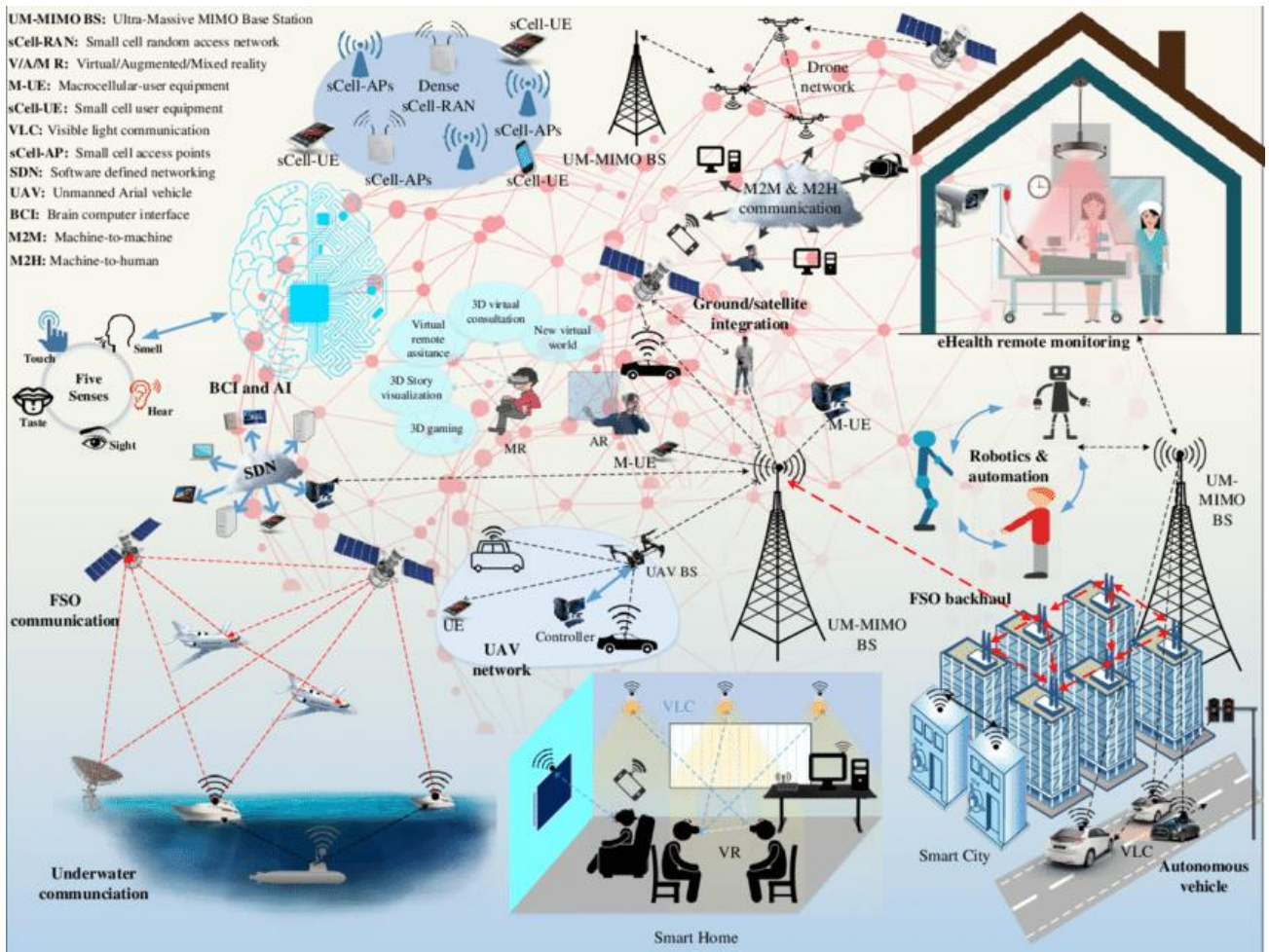


Рис. 1.1. Багаторівнева архітектура 6G, яка об'єднує інфраструктуру різних розмірів і призначень

Додатки 6G можна охарактеризувати як послуги uMUB, uHLSLLC, mMTC та uHDD. Деякі ключові перспективи та застосування бездротового зв'язку 6G коротко описані нижче.

Надрозумне суспільство: чудові характеристики 6G прискорять побудову інтелектуальних суспільств, що призведе до покращення якості життя, моніторингу навколишнього середовища та автоматизації з використанням зв'язку M2M на основі штучного інтелекту та збору енергії. Цю програму можна охарактеризувати по всіх сервісах uMUB, uHLSLLC, mMTC та uHDD. Бездротовий зв'язок 6G зробить наше суспільство надрозумним за рахунок

використання інтелектуальних мобільних пристроїв, автономних транспортних засобів тощо. Крім того, у багатьох містах світу з'являться літаючі таксі на базі бездротової технології 6G. Розумні будинки стають реальністю, тому що будь-яким пристроєм у віддаленому місці можна керувати за допомогою команди, що подається зі смарт-пристрою.

Розширена реальність: послуги розширеної реальності (далі - XR), включаючи доповнену реальність (AR), змішану реальність (MR) і VR, є важливими особливостями систем зв'язку 6G. Всі ці функції використовують 3D-об'єкти та штучний інтелект як найважливіші рушійні елементи. Крім забезпечення вимог сприйняття обчислень, пізнання, зберігання, людських почуттів та фізіології, 6G забезпечить дійсно захоплюючий досвід AR / MR / VR за рахунок спільної інтеграції дизайну та високоякісного бездротового зв'язку 6G. Передові особливості пристроїв, таких як пристрої XR, зображення і голограми високої чіткості, а також п'ять почуттів комунікації прискорюють можливість виконання спілкування між людьми і речами. Інноваційні розваги та корпоративні послуги, такі як ігри,

Перегляд та спорт надаються без обмежень за часом та місцем. VR - це змодельований на комп'ютері тривимірний досвід, в якому комп'ютерні технології використовують гарнітури реальності для створення реалістичних відчуттів та відтворення реального середовища або створення уявного світу. Справжня віртуальна реальність задіяє усі п'ять почуттів. AR - це перегляд реального фізичного світу в реальному часі, елементи якого доповнюються різними вхідними комп'ютерними сигналами датчиків, такими як аудіо, відео, візуальні ефекти і дані глобальної системи позиціонування (GPS). Він використовує існуючу реальність та доповнює її, використовуючи якийсь пристрій. MR об'єднує реальний та віртуальний світи для створення нової атмосфери та візуалізації для взаємодії в реальному часі. Його також іноді називають гібридною реальністю. Однією з найважливіших характеристик MR і

те, що штучний і реальний контент можуть реагувати друг на друга як реального часу. XR відноситься до всіх об'єднаних реальних і віртуальних середовищ і взаємодій людини з машиною, створюваним комп'ютерними технологіями і пристроями, що носяться. Він включає всі його описові форми, такі як AR, VR і MR. Він поєднує AR, VR та MR під одним терміном.

1.2 Застосування БПЛА

Мережі 6G будуть підтримувати наземний контролер та системний зв'язок між БПЛА та землею. БПЛА – це різновид безпілотного літального апарату.

БПЛА допомагають у багатьох областях, таких як армія, торгівля, наука, сільське господарство, відпочинок, закон і порядок, доставка продукції, спостереження, аерофотозйомка, управління стихійними лихами та гонки дронів. Більше того, БПЛА буде використовуватися для підтримки бездротового мовлення та високошвидкісної передачі, коли базова станція стільникового зв'язку (BS) відсутня або не працює.

1.3 Застосування міліметрового діапазону

Інтеграція технологій та стандартів в ММД може підвищити ефективність використання доступного частотного ресурсу і пропускну здатність безпроводових та кабельних мереж

Обмеження та особливості реалізації радіоканалів ММД виявляються через обмеження зони покриття вимагають застосування гібридних інтегрованих мереж, що працюють в різних діапазонах LTE, ММД (28 ГГц, 60 ГГц, E-діапазон).

Крім того, через значне поглинання сигналу і наявності сильних шумів, наприклад, фазового шуму і не лінійності підсилювача, широка смуга

пропускання в міліметровому та оптичному діапазонах до теперішнього часу не була повністю використана.

Сучасні стільникові архітектури підтримують більш гнучке розгортання радіоресурсів, які можуть розподілятися з використанням технології хмарної мережі радіо доступу. На рис. 1.1. показано приклад макростільника в еволюції від 4G до 6G, що об'єднує віддалені мікростільники (RNN), інфраструктуру фіксованого стільникового зв'язку, мобільні мережі, Інтернет, зв'язок між транспортними засобами (англ. vehicle-to-vehicle, V2V) і інфраструктурою, між машинну взаємодію (англ. machine-to-machine, M2M), піринговий одноранговий зв'язок (англ. peer-to-peer, P2P) і т.д. через транзитні з'єднання.

Однак, транзитні з'єднання, наприклад, між 4G і WiFi, а не радіоінтерфейс, часто є джерелами вузьких місць трафіку в сучасних мережах. Застосування технологій ММД і гібридних технологій, наприклад, гетерогенної топології мережі (HetNets), можуть істотно підвищити продуктивність і енергоефективність безпроводових мереж, а також забезпечують безшовну передачу інформації. Застосування малих розмірів стільників 30-150 м з невеликою кількістю користувачів можуть забезпечити більшу ширину спектру радіочастот ММД для кожного користувача, і внаслідок збільшити спектральну ефективність (за рахунок повторного використання спектру) і загальну ємність мережі.

Транзитний транспорт переносить трафік між локальною підмережею (наприклад, сполуками між UE і BS) і базовою мережею (наприклад, Інтернет та телефонний офіс з комутацією мобільного зв'язку). Однак, транзитні з'єднання, наприклад, 4G і WiFi, а не радіо інтерфейс, часто є джерелами вузьких місць трафіку в сучасних мережах. Застосування технологій ММД і гібридних технологій, наприклад, гетерогенної топології мережі (HetNets) різних розмірів і призначень, можуть істотно підвищити продуктивність і енергоефективність безпроводових мереж, а також забезпечують безшовну передачу інформації (рис.

1.8). Малі розміри стільників 30-150 м з невеликою кількістю користувачів забезпечують більшу ширину спектру радіочастот ММД для кожного користувача, і внаслідок збільшують спектральну ефективність (за рахунок повторного використання спектру) і загальну ємність мережі.

Для зв'язку базових станцій з центрами обробки і зберігання інформації в ММД ефективним рішенням є використання оптоволоконних ліній, в яких сигнали ММД конвертуються в оптичний діапазон за RoF технологією і передаються на великі відстані.

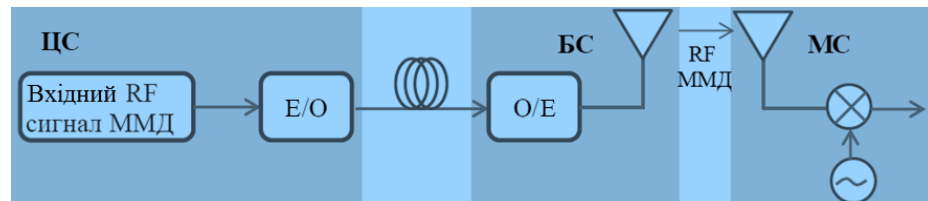


Рис. 1.2. Структура каналу для мобільної системи ММД з використанням технології RoF; ЦС - центральна станція, БС - базова станція, МС - мобільна станція, О/Е - оптоелектронний перетворювач, RF - радіочастотний сигнал ММД

1.4 Застосування інтегрованого оптичного зв'язку

Оптика і фотоніка є одними з ключових технологій майбутніх технологій і пропонують потенціал для нових застосувань у таких різноманітних областях, як зондування та спектроскопія, аналітика, моніторинг, біомедична візуалізація та діагностика, а також технології оптичного зв'язку тощо. Було проведено багато досліджень з передачі хвиль по оптоволоконним лініям зв'язку, які використовують переваги як оптичних волокон, так і хвиль ММД для створення широкосмугових систем (до 10 ГГц) зв'язку RoF.

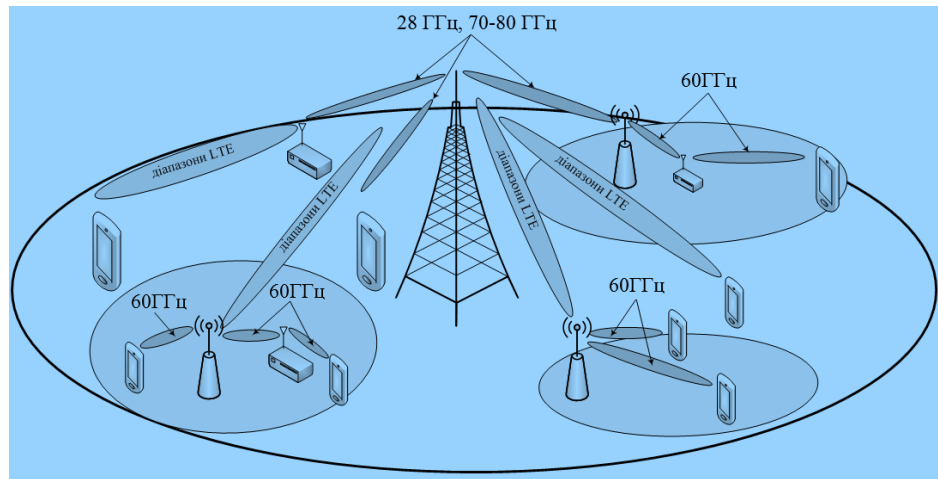


Рис.1.3. Гібридна конфігурація Het-Nets з використанням міліметрового діапазону та діапазону LTE

На рис.1.4 представлена волоконно-ефірна конфігурація мережі із використанням ММД. Центральна станція (ЦС) і розподілені базові станції (БС) пов'язані з оптичними волокнами.

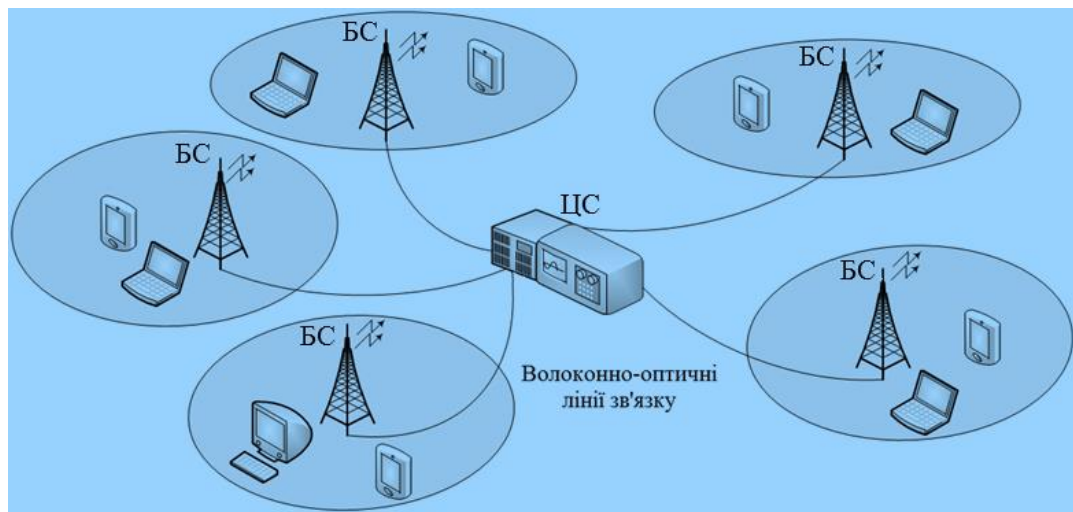


Рис.1.4. Гібридна волоконно-ефірна конфігурація мережі у ММД : базові станції стільників, що працюють в ММД зв'язані через волоконно-оптичні лінії

У кожному фемто- або піко-стільнику взаємодія між мобільними терміналами і базовими станціями відбувається в ММД. Вирішальне значення для використання ММХ в стільникових мережах має велика швидкість обробки сигналів і передачі на великі відстані, які не може забезпечити ММД, спрямована передача і гібридне аналогово-цифрове формування променю в технології МІМО, в якій також задіяні оптоелектронні методи мікрохвильової фотоніки.

Гібридні оптоелектронні методи формування діаграм спрямованості фазованих антенних решіток (ФАР). ФАР відіграють важливу роль в сучасних радіолокаційних і безпроводових системах зв'язку. В адаптивних ФАР можлива адаптація не тільки діаграми спрямованості, а й інших параметрів, таких як захисний інтервал OFDM сигналу і ін. Останнім часом активно розвивається напрямок МІМО систем зв'язку, в яких ФАР використовуються як на приймальній стороні, так і на передавальній стороні.

Розвитком класичного підходу до адаптації ФАР є адаптивна зміна кількості каналів системи (Massive МІМО) залежно від завадової ситуації, що забезпечується на основі кластеризації груп антенних елементів цифрової ФАР в підрешітки. Крім адаптивної комбінації різних за формою підрешіток і окремо взятих випромінювачів ФАР, можливо здійснити також комбінацію в передавальній антенній системі різних типів сигналів. Наприклад, поєднання сигналів OFDM (NOFDM), їх кодованих модифікацій (C-OFDM, CN-OFDM), FBMC та інших сигнальних конструкцій в одних підрешітках з режимом ППРЧ (псевдовипадкове перестроювання робочої частоти).

Вважається, що мобільні системи ММД (антени базової станції) надаватимуть кожному користувачу власну радіочастотну діаграму спрямованості з вузькоспрямованим інформаційним каналом. Також для технологій ММХ передбачається смуга частот для одного каналу до 10 ГГц з

миттєвою обробкою сигналу, що також вимагає фотонних (оптоелектронних) методів обробки сигналів. Тому на розвиток оптичних методів формування і обробки радіосигналів важливий вплив чинять досягнення в фотонній інтегральній техніці та кремнієвій фотоніці.

Інтеграція швидкодіючих фотодетекторів з антенними елементами фазованої антенної решітки Для реалізації перспективних широкосмугових телекомунікаційних систем в ММД необхідна технологія формування випромінювання з високим коефіцієнтом підсилення і динамічними параметрами для уникнення завад (блокувань) сигналу. До того ж на частотах ММД властиві високі значні втрати на трасі та енергоспоживання, що накладає серйозні обмеження на дальність передачі сигналів. ФАР є ключовою технологією для майбутніх широкосмугових мобільних додатків 5G і наступних поколінь, в яких формування променя керується амплітудою і фазою змінних струмів, які живлять випромінювальні елементи ФАР. Крім того, для обробки втрат на трасі в поєднанні з низькою потужністю випромінювання і динамічно керованими ФАР забезпечують більш високу ступінь захисту від випромінювання, підвищують стійкість до багатопроменевого розповсюдження і зменшують завади в каналах, що в цілому підвищує енергетичну і спектральну ефективність. Однак формування діаграм спрямованості ФАР на частотах ММД електричним методом є складною проблемою, пов'язаною з формуванням фазових затримок з низькими шумами (втратами), вузькою смугою електричних компонентів, громіздкістю і складністю пристроїв. Оптикоелектронні (фотонні) методи формування діаграм спрямованості ФАР, як показано у 2 розділі, забезпечують більш широку смугу пропускання і менші втрати в порівнянні з електричними компонентами, що робить оптикоелектронні управління ФАР рішенням для інтелектуальних антен в ММД. Однак оптикоелектронні методи для ФАР мають серйозні проблемами пов'язані з інтеграцією швидкодіючого фотодетектора з антеною, що вимагає

ретельного проектування, в якому слід приділяти особливу увагу аналізу енергетичного балансу, а також управління фазою і амплітудою антенних елементів повинно виконуватися ефективним чином. Налаштування фази можуть бути досягнуті з використанням диференціальної затримки τ , і для лінійних ФАР умова для максимального підсилення згідно:

$$\theta_{\max} = \sin(2\tau f_{\text{RF}}) \quad (1.1)$$

Генерація, настроювання частоти ММД фотонними методи аналізувалася в 3 розділі. Основні ефективні методи засновані на зовнішній модуляції і оптичному гетеродинуванні (битті в РД спектральних компонент, розділених на необхідну частоту RF сигналу).

Для ефективності інтеграції оптоелектронних технологій в телекомунікаційних мережах в ММД, зокрема, із застосуванням інтеграції швидкодіючих фотодетекторів в ФАР, необхідно враховувати шумові характеристики антени передавального модуля в залежності від архітектури формування променя.

Топологія інтегрованого оптичного зв'язку. Конкурентом волоконно-оптичних ліній зв'язку можуть стати стратосферні системи, в яких використовуються канали зв'язку з ретрансляторами на висоті близько 20 км (рис. 1.5). Стратосферні ретранслятори, які можуть виконувати функцію базових станцій, розподілені в горизонтальний ланцюг, зв'язок і коригування положення виконується в оптичному діапазоні. Проекти створення стратосферних систем зв'язку з певною періодичністю з'являлися починаючи з 1940-х рр., коли розглядалася концепція використання стратосферних дирижаблів в якості низькоорбітальних супутників Землі.

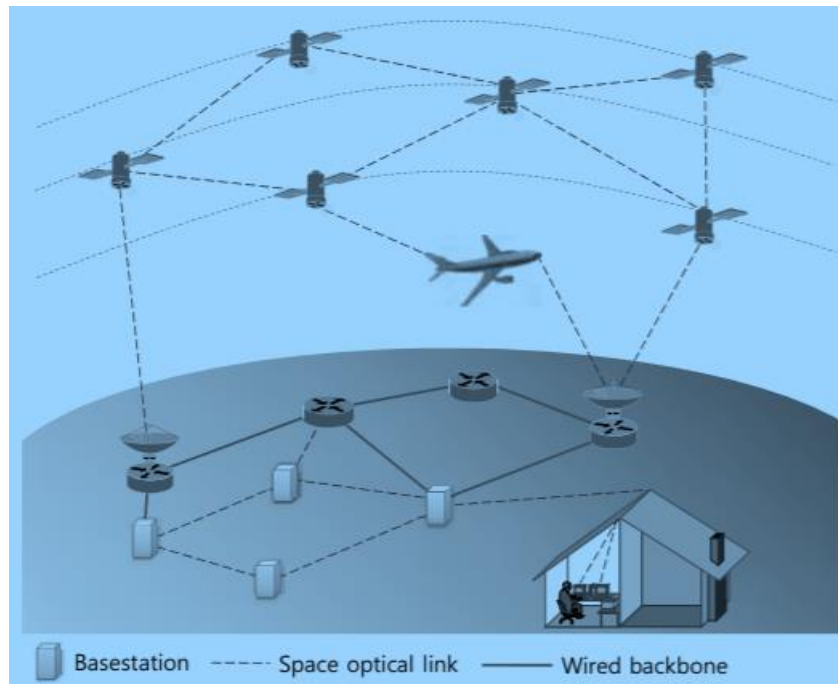


Рис. 1.5. Концептуальна топологія інтегрованого оптичного зв'язку: супутникові, наземні та домашні мережі.

1.5 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.

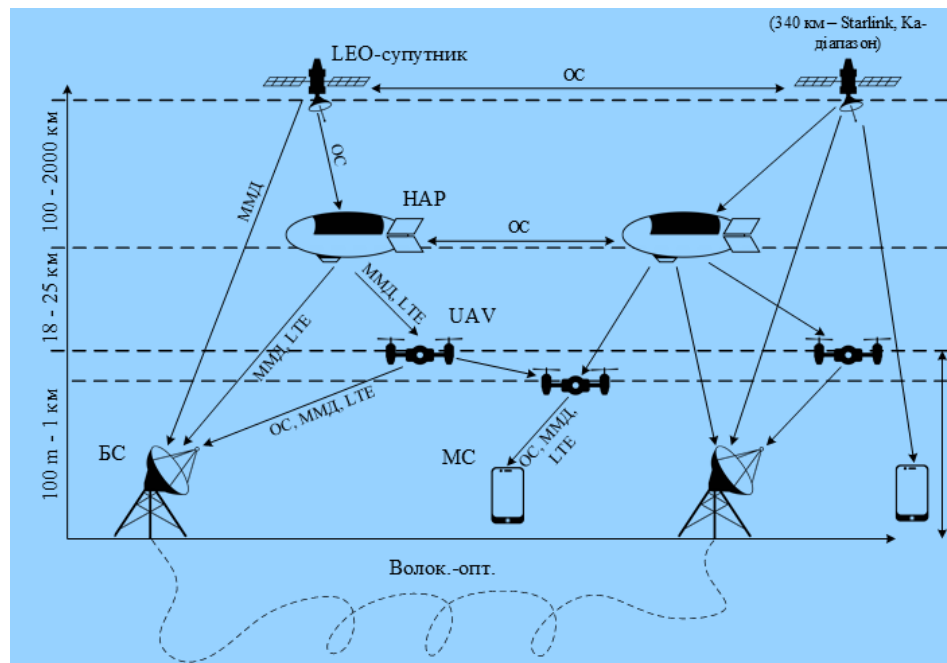


Рисунок 1.6. Архітектура багаторівневого космічного зв'язку з використанням низькоорбітальних супутників, стратосферних платформ та безпілотних ретрансляторів.

1.6 Переваги та вимоги до застосування інтегрованого оптичного зв'язку

1. Фотонні (оптоелектронні) методи генерації, модуляції та передачі радіосигналів ММД є ключем до практичної реалізації волоконно-ефірних інтегрованих систем і мереж телекомунікації.

2. Важливими компонентами (можливо й основними), від яких залежить продуктивність телекомунікаційних волоконно-ефірних систем, є модулятори інтенсивності оптичного випромінювання та фотодетектори (фотодіоди). Від знаходження методів поліпшення радіочастотних характеристик цих приладів, таких як, дискретність перестроювання частоти та фази, вихідна потужність сигналів (як оптична так і електрична), ефективність перетворення оптичної

потужності в електричну, смуга пропускання, шумові характеристики, залежить подальше впровадження волоконно-ефірних телекомунікаційних систем.

3. Методами компенсації технологічних обмежень оптоелектронних компонентів в ММД, таких як дистанційне гетеродинування, поляризаційний розподіл інтегрований з технологією МІМО, поєднання зовнішньої модуляції інтенсивності з технікою множення частоти, можливо реалізувати генерацію та передачу високочастотного сигналу ММД із зменшеною пропускну здатністю для оптичних та електричних компонентів передавача.

4 Використанням інтеграції волоконно-ефірних технологій практично можливо здійснити формування та модуляцію в форматі високого порядку сигналів у ММД, включаючи перспективні смуги 18-27 ГГц, 33-50 ГГц, 57-64 ГГц, 71-76 ГГц, 81-86 ГГц і т.д.; передачу конвертованих радіосигналів по оптичному волокну на великі відстані та мультиплексування радіоканалів за технологією WDM; просторове мультиплексування, включаючи просторове мультиплексування МІМО; мультиплексування, що інтегроване з технікою оптичного поляризаційного мультиплексування.

5. Використання дистанційного гетеродинування сигналів в ММД зможе зменшити вплив поляризаційної модової дисперсії та інших лінійних і нелінійних оптичних спотворень в таких системах. Такі переваги зможуть сприяти реалізації мультиплексування за поділом по поляризації, реалізації адаптивних систем за вибором радіочастот (піддіапазонів ММД), що також зможе підвищити ефективність використання МІМО технології.

6. Волоконно-ефірні технології з дистанційним оптичним гетеродинуванням спроможні здійснити безшовну інтеграцію складної структури майбутніх телекомунікаційних мереж з можливістю адаптації під різні вимоги, в яких можливо перелаштовувати робочу частоту для різних мереж HetNet, в тому

числі для різних піддіапазонів ММД з високою пропускнуою здатністю порівняну зі швидкістю в волоконно-оптичних мережах.

7. Волоконно-ефірні системи зможуть вирішити проблеми слабких місць в конфігурації безпроводових мереж, наприклад, волоконно-оптичні ліній, можуть з'єднувати базові станції (стілники різних розмірів) і центри обробки інформації з забезпеченням високої пропускнуої здатності за рахунок можливості спектрального мультиплексування та використання форматів модуляції високого порядку.

8. Запропонований метод відновлення оптичного сигналу з радіосигналу ММД, переданого по безпроводовому каналу для передавання в наступну волоконно-оптичну мережу, може бути використаний для покращення шумових характеристик та спектральної ефективності багатоканальних систем передачі інформації.

1.7 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 пропускну здатність відповідає ширині каналу. Для мобільних систем 5 G рішенням збільшення пропускнуої 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

стільников 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. 1.7), особливо в вікнах поглинання атмосфери. В області 100 ГГц досліджуються явища перевипромінювання в атмосфері [9].

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) [10].

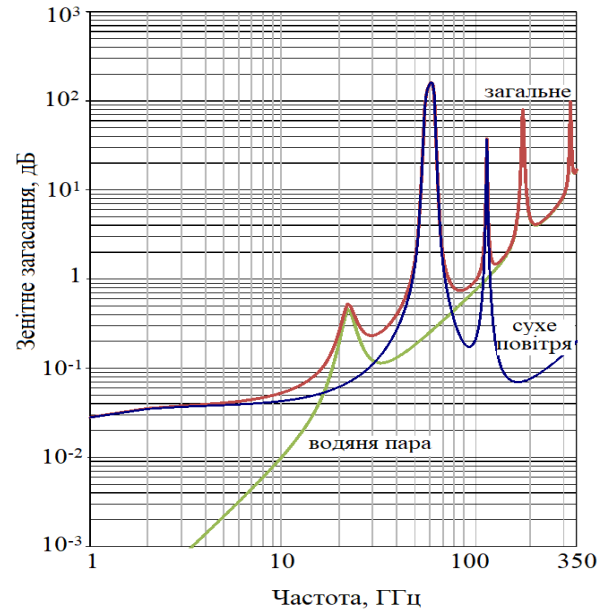


Рис.1.7. Загальна зенітна заганяність, заганяність в сухому повітрі і водяній парі (тиск = 1013,25 гПа; температура = 15 ° С; щільність водяної пари = 7,5 г/м³)

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

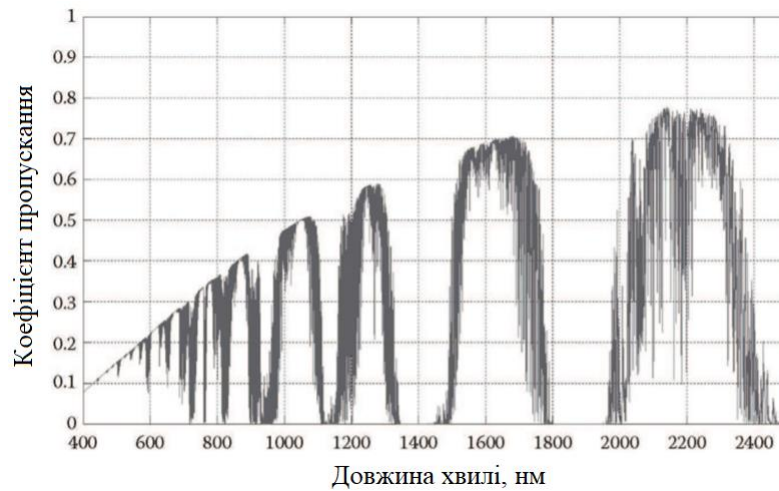


Рис. 1.8. Коефіцієнт пропускання атмосфери в залежності від довжини хвилі

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 пропускної 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 надширокопосмугові методи модуляції, просторове багатопроменеве мультиплексування, методи когнітивного спектру (SDR).

1.8 Проект HydRON

У грудні 2016 року країни-члени ESA створили нову спеціальну програму SatCom «Технологія безпеки та лазерного зв'язку», яка називається «ScyLight». Нова структура була створена як новий елемент для здійснення інтегрованих додатків (TIA) ESA в рамках програми «Розширені дослідження в телекомунікаційних системах (ARTES)». «ScyLight» стосується розвитку та еволюції інноваційних технологій оптичного зв'язку та, за бажанням, відповідних можливостей польоту для їх перевірки на орбіті. Наприклад, GEO LCT наступного покоління (NGGL) від TESAT-SpaceCom на даний момент є однією з головних розробок в рамках «ScyLight». Щоб стимулювати розвиток оптичних комунікаційних технологій і дати європейській та канадській

промисловості додаткові можливості для підтвердження своїх технологій на орбіті, ESA запропонували новий проект під назвою «HydRON», що розшифровується як «High Throughput Optical Network». HydRON (рис.1.7) прагне дати відповідь на тенденцію до інтеграції космосу та архітектури наземних мереж за допомогою архітектури терабітно-оптичної мережі - “Fibre in the Sky” (укр.волокно в небі).

Насьогодні супутникові та мега-сузір'я з дуже високої пропускною здатністю доповнюють (а в деяких конкретних випадках конкурують) з наземними волоконними мережами високої пропускної здатності. Optical Communications може забезпечити дуже гнучкі можливості космічної мережі, які можуть впоратися з високими вимогами до даних.

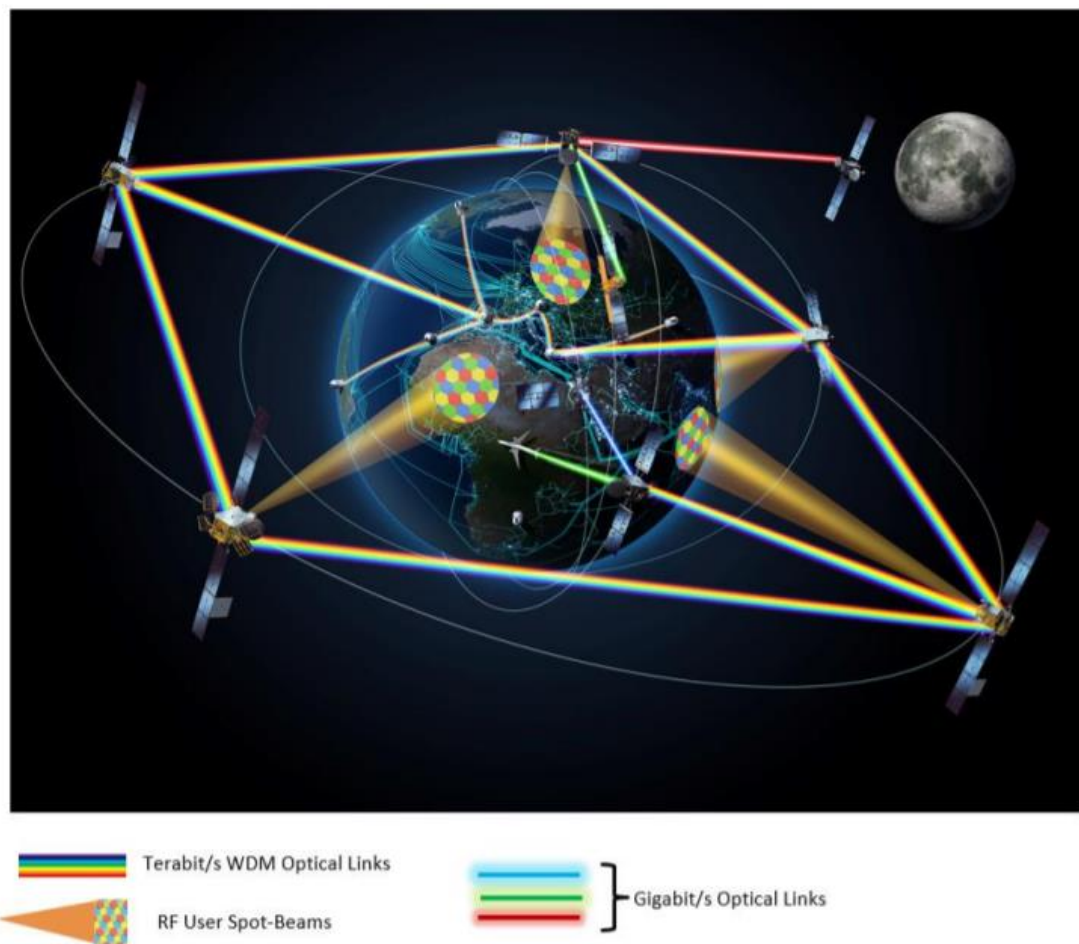


Рис. 1.9. Концепція проекту HydRON для повної оптичної космічної мережі, інтегрованої в інфраструктуру наземної мережі

Надзвичайно висока пропускна здатність, ефективна маршрутизація даних і гнучкий розподіл пропускної спроможності в просторі необхідні в майбутньому, щоб впоратися з цими вимогами.

Технологія оптичного зв'язку може обслуговувати гнучкі/масштабовані мультимережі (наземні, XEO, HAPS, RPAS, NAV, EO) із внутрішньою безпекою та кіберзахищеністю. Це дозволить перейти від розділених наземних і космічних сегментів до повноцінної інтегрованої системи і, отже, різко скоротити витрати на володіння рішеннями SatCom.

Після того, як оптичні комунікаційні технології, необхідні для реалізації надійного простору до/з землі, оптичних каналів, внутрішньо- та міжсупутникових лазерних каналів та оптичної маршрутизації (тобто, оптичні крос-з'єднання, реконфігурований оптичний мультиплексор додаткового доступу) освоєні,- це забезпечить найвищий потенціал зростання.

Концепція системи має на меті продемонструвати, що:

- Повністю оптичні супутникові вузли (GEO/NON-GEO) можуть виробляти надзвичайно високу пропускну здатність даних до терабіт в секунду на канал зв'язку та забезпечують оптичну перемаршрутизацію/перемикання потоків даних, можуть виконувати аналогічні стандартні концепції волокна, які зазвичай застосовуються в наземних системах.

- Вплив атмосферних умов можна зменшити, використовуючи можливості мережі HydRON для перерозподілу даних на орбіті, а отже, спеціальні оптичні станції висхідного/східного зв'язку HydRON Terabit:о може розташовуватися в географічних районах з високою доступністю зв'язку (гарні погодні умови) або о може розташовуватися поблизу точок доступу до наземної мережі та може обслуговувати більше одного супутника паралельно та уникати дорогого часу очікування.

- Внутрішні можливості розповсюдження даних HydRON також дозволять збирати та розповсюджувати дані користувача в архітектурі мережі, подібно до наземної оптоволоконної мережі.

- Нові концепції мережі з акцентом на космічному сегменті та його конкретних операційних обмеженнях (наприклад, маневри утримання станції, передача оптичної наземної станції через погодні умови), водночас, спрямоване на високу інтеграцію із наземним мережами, що виграє від процесів штучного інтелекту для оптимізації та забезпечення надзвичайно гнучкої та інтегрованої мережі.

Програмні цілі HydRON:

- Сприяти реалізації Оптичної дорожньої карти для забезпечення промислового потенціалу Європи та Канади у таких сферах:

- Внутрішньосупутникова фотоніка
- Оптичні термінали (космос і земля)
- Концепція оптичної мережі
- Інтеграція кінцевих користувачів (прості, оператори)

2 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ІНТЕГРОВАНИХ ВОЛОКОННО-ЕФІРНИХ СИСТЕМ

Через зростаючу популярність Інтернету та стрімке зростання мобільних технологій люди стали сильно залежати від онлайн-сервісів. Останні статистичні дані показали, що використання Інтернету, надійного засобу зв'язку в суспільстві, збільшується на 40% на рік у Північній Америці і приблизно на 20% у всьому світі. Очікується, що кількість користувачів різко збільшиться. Таким чином, потрібна система широкосмугового зв'язку з високою пропускну здатністю. Володіючи високою пропускну здатністю, порівняно низькою вартістю та низьким згасанням, оптичне волокно є ідеальним рішенням для виконання між'єднань. Крім того, радіосистема забезпечує значну мобільність, гнучкість та легкий доступ. Системна інтеграція оптичних і радіомереж може задовольнити зростаючі потреби абонентів у послугах передачі голосу, даних та мультимедіа, які вимагають, щоб мережа доступу підтримувала високу швидкість передачі даних у будь-який час і в будь-якому місці з невеликими витратами. Інтеграція оптичних і радіомереж потенційно може стати основою мережі бездротового доступу, і за останнє десятиліття він набув значного імпульсу як потенційної схеми доступу останньої милі.

Системи оптоволоконного зв'язку мають найвищу пропускну здатність, що робить ці системи опорою сучасних телекомунікацій. Через різні обмеження, такі як географічне положення, економічний баланс, стратегія провайдера та ситуація зі шкодою у разі лих, високошвидкісні з'єднання на основі оптичного волокна, такого як оптоволокно, що веде до будинку, не завжди можуть бути розгорнуті всюди. Таким чином, канал радіопередачі розглядається для об'єднання великих мережевих потоків, який має пріоритетні характеристики при розгортанні системи, такі як гнучкість та простота установки. Таким чином, інтеграція

оптичної та бездротової мережі виконується для забезпечення достатньої пропускної спроможності для окремих користувачів. Ця мережа називається технологією радіо по оптоволокну (RoF). Щоб задовольнити смугу пропускання користувачів, що постійно зростає, і вимоги до бездротового зв'язку в широкосмугових, інтерактивних і мультимедійних бездротових послугах, технологія RoF була запропонована як перспективне економічне рішення. RoF - це аналоговий оптичний канал для передачі інформації по оптичному волокну шляхом передачі модульованих радіочастотних (RF) сигналів на центральну станцію (CS) і назад на базову станцію (BS) або віддалений антенний блок (RAU). Ця модуляція може виконуватись безпосередньо радіосигналом або на проміжній частоті. Іншими словами, RoF означає передачу інформації з оптичного волокна шляхом модуляції світла радіосигналом.

RoF служить високошвидкісною бездротовою локальною або персональною мережею. Частоти радіосигналів, що поширюються системами RoF, охоплюють широкий діапазон (зазвичай у діапазоні ГГц) і залежить від характеру додатків. У системах RoF бездротові сигнали передаються в оптичній формі між базовою станцією та набором базових станцій перед передачею повітрям. Більшість процесів обробки сигналів (включаючи кодування, мультиплексування, генерацію та модуляцію РЧ) виконується центральним офісом (CO), що робить BS економічно вигідною. Кожна BS пристосована для зв'язку по радіоканалу щонайменше з однією мобільною станцією користувача, розташованої в радіусі дії згаданої BS. Таким чином, RoF стане ключовою технологією у системі мобільного зв'язку наступного покоління.

2.1 Оптоелектронна обробка радіочастотних сигналів та рішення інтеграції безпроводових та волоконно-оптичних технологій

Основні мережеві рішення, де застосовуються інтегровані волоконно-оптичні технології здебільшого складається з трьох частин: 1) з'єднання центральних станцій та базових станцій через оптичне волокно; 2) у центральних станціях обробки інформації в основному використовують оптоелектронні методи модуляції радіочастотних сигналів, після створення конвертованого радіочастотного сигналу на оптичній несучій він передається на базову станцію через оптичні волокна; 3) Потім сигнал передається користувачеві через радіоантену, де знову-таки оптоелектронними методами оптичний сигнал перетворюється на електричний. Модуляція може бути виконана безпосередньо з РЧ-сигналами або проміжною частотою (IF сигнали). Спектр радіосигналів, що в даний час виділяються мережевими системами RoF, зазвичай дуже широкі, в перспективі до декількох ГГц. І для конвертації радіосигналу в оптичному діапазоні практично не обмежень до 1 ТГц, так і схеми модуляції. Однак у електричній частині такої гібридної технології практичне обмеження до 160 ГГц. Безпроводовий зв'язок в ММД і ОД має великий потенціал для використання в безпроводових системах зв'язку. На даний момент інтеграція безпроводових технологій у міліметровому та оптичному діапазонах, оптоволоконних з'єднуючих ліній має ключове рішення для майбутніх систем зв'язку.

Оптоелектронна обробка радіочастотних (РЧ) сигналів використовується в широкому колі додатків через широку смугу пропускання, високу загальну продуктивність, нижчі втрати в порівнянні з електронними радіочастотними технологіями, високий ступінь реконфігурованості і універсальність пристроїв, і найважливіше надзвичайно високий рівень нечутливості до електромагнітних . Основні додатки використання оптоелектронних (фотонних) технологій лежать у галузі радіолокації, зв'язку та зондування, об'єднання використання цих

областей є перспективною у майбутніх телекомунікаціях. За допомогою гібридних волоконно-ефірних систем оптоелектронних технологій перетворення інформаційних сигналів отримано багато різних технічних рішень, таких як удосконалені модулятори формату кодування, пристрої для формування діаграм спрямованості, процесори РЧ-сигналів на основі поперечної фільтрації, РЧ-каналізатори та аналізатори спектру та багато іншого. Формати високого порядку для модуляції РЧ-сигналу в міліметровому та терагерцовому діапазоні були досягнуті за допомогою оптоелектронних модуляторів, а формат модуляції як оптичного, так і РЧ-сигналу безпосередньо впливає на пропускну здатність, а також на його спектральну ефективність систем телекомунікацій. Отже, використання гібридних волоконно-ефірних та оптоелектронних технологій є ключовими факторами при розробці перспективних систем зв'язку.

Також вважається, що рішення поєднання переваг наземних та неназемних телекомунікаційних систем, технологій FSO, високочастотних діапазонів ММД та терагерцового діапазонів, волоконно-оптичних магістралей може здійснити пропускну здатність таких інтегрованих мереж, яка властива волоконно-оптичним технологіям.

Мережева волоконно-ефірна система передає дані оптоволоконним кабелям, використовуючи модуляцію оптичної несучої радіочастотним інформаційним сигналом. Модуляція може бути виконана безпосередньо РЧ-сигналами або сигналами проміжної частоти (ПЧ). Спектр радіосигналів, що розподіляються в даний час мережевими системами RoF, дуже широкий, зазвичай гігагерц, залежно від програми. Практично, будь-який тип схем модуляції радіосигналу теоретично може бути переданий в оптоволоконній частині волоконно-ефірної системи.

Сучасні системи зв'язку переважно працюють у смузі частот 800 МГц ~ 30 ГГц. Таким чином, доступні ресурси спектру вже дуже обмежені, що серйозно ускладнює розвиток мобільного зв'язку. Якщо в якості несучого сигналу можна

використовувати високочастотний міліметровий діапазон, можна буде подолати перешкоду у вигляді нестачі ресурсів спектру, а також стане можливим високошвидкісний бездротовий широкосмуговий доступ, що робить актуальнішим розвиток високочастотного регіонального спектру та відповідних послуг та додатків.

Хвилі ММД відносяться до мікрохвиль з довжиною хвилі 1 мм ~ 10 мм, що відповідає діапазону частот 30 ~ 300 ГГц. Для сучасних технологій бездротового зв'язку частотний діапазон до 270 ГГц є значним та цінним ресурсом. Найбільш важливим моментом є те, що сигнал міліметрового діапазону частот 40-60 ГГц може використовуватися без дозволу на міжнародному рівні. Таким чином, останнім часом у світі приділяється велика увага дослідженням та застосуванню технологій зв'язку на основі високочастотних міліметрових хвиль. Система високочастотного бездротового зв'язку міліметрового діапазону має такі переваги:

- Міліметровий діапазон має дуже високу частоту та широкосмугову смугу пропускання, що дозволяє здійснювати передачу даних із надвеликою пропускнуою здатністю. Швидкість передачі може досягати кількох сотень Гбіт/с, до 1 ТБ/с.

- Радіоантени системи базових станцій бездротового зв'язку, що використовує технологію несучої міліметрового діапазону, більш мініатюрні, що дуже корисно для встановлення, обслуговування та розширення функцій.

- Спрямований промінь міліметрових хвиль має дуже високу спрямованість при поширенні в просторі, що збільшує завадостійкість та поширення сигналу та забезпечує інформаційну безпеку. Таким чином, поширення ММД є більш стабільним та надійним з високим коефіцієнтом безпеки.

2.2 Схема генерації міліметрового діапазону оптоелектронними методами

Пряма передача міліметрового діапазону має безліч переваг, включаючи високу пропускну здатність, простоту розгортання та адаптованість до навколишнього середовища. Для досягнення високої спектральної ефективності необхідно підтримувати мережну систему RoF реалізації сигналізації. Фактично, в недавній дослідницькій роботі було запропоновано та перевірено експериментально багато мережевих систем RoF, заснованих на міліметровому діапазоні. Нижче наводиться коротке введення у кілька схем модуляції, які можуть генерувати високочастотні міліметрові хвилі на основі фотонної допомоги.

2.2.1 Лазер із прямою модуляцією (англ. Directly Modulated Laser DML).

На рис.2.1 представлена структурна схеми DML. Це схема модуляції, яка перетворює інформацію в електричні сигнали і модулює оптичну потужність, так що радіочастотні сигнали можуть передаватися на оптичній несучій [15]. Такий метод в основному модулює радіочастотні сигнали усуненням постійного струму лазера, а потім модулює їх оптичним сигналом через DML. Таким чином, формуються електричні сигнали міліметрового діапазону після оптоелектронного перетворення на фотодіоді (англ. photodiode, PD) на віддаленому кінці лінії передачі. Після фільтрації непотрібного шуму смуговим фільтром (англ. band pass filter, BPF) електричний сигнал, що генерується, міліметрового діапазону посилюється електричним підсилювачем (англ. electrical amplifier, EA) і передається користувачеві через антену. Через те, що радіочастотний сигнал модулюється інтенсивністю оптичної несучої, цей метод називається модуляцією інтенсивності (англ. intensity modulation, IM). Така схема

модуляції розділена лише на два робочі стани зі світлом і без світла або з невеликою кількістю світла. На приймачі це питання визначення двох станів.

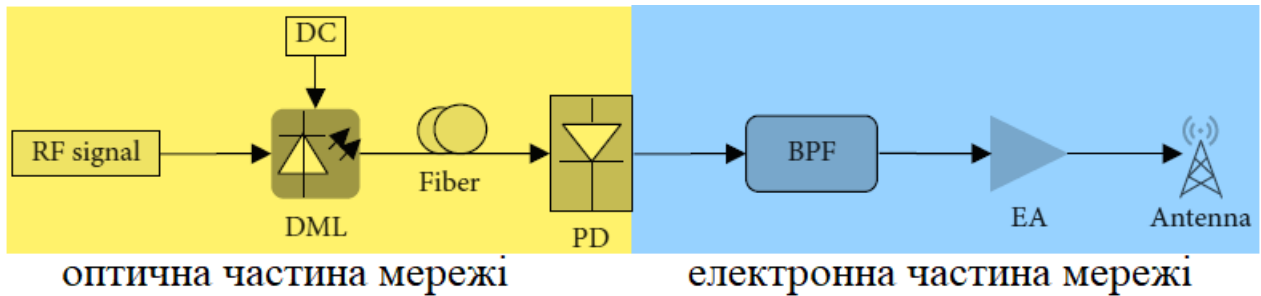


Рис.2.1. Структурна схема прямої генерації радіосигналу оптоелектронним методом

Пропонована схема проста за конструкцією і невисока за вартістю. Але через обмежену ширину смуги модуляції DML генерована частота міліметрового діапазону відносно низька. За межами частоти модулюючого сигналу близько 10 ГГц спостерігається явище хроматичної дисперсії, яке призводить до розширення оптичного імпульсу, тому імпульси перекриватиметься з наступним імпульсом, що називається міжсимвольною інтерференцією. Крім того, оскільки зміна струму вплине на показник заломлення активної області напівпровідникового лазера та призведе до зміни резонансної довжини хвилі, буде введено додаткову фазову модуляцію та частотний чірплет, що вплине на характеристики модуляції. Як правило, пряма модуляція не підходить для високочастотних мережевих волоконно-ефірних систем. І здебільшого такий метод використовується для передачі низькочастотних систем. Щоб подолати явище частотного чирпування і поліпшити швидкість передачі використовується схема зовнішньої модуляції.

2.2.2 Зовнішня модуляція

Для частоти вище, ніж 10 ГГц коефіцієнт помилок по бітах (BER), що спостерігається у форматі Метод зовнішньої модуляції є більш прийнятним для

більшої частоти. Зазвичай це виконується за допомогою високошвидкісного зовнішнього модулятора, який зазвичай включає модулятор інтенсивності (ІМ), фазовий модулятор (РМ) і електропоглинаючий модулятор поглинання (ЕАМ) для отримання високоякісного мікрохвильові сигнали. Електропоглинаючий модулятор - напівпровідниковий пристрій, який можна використовувати для модуляції інтенсивності лазерного випромінювання за допомогою електричної напруги. Його принцип дії ґрунтується на ефекті Франца – Келдиша. Схема роботи зовнішнього модулятора сигналів ММД показано на рис. 2.2.

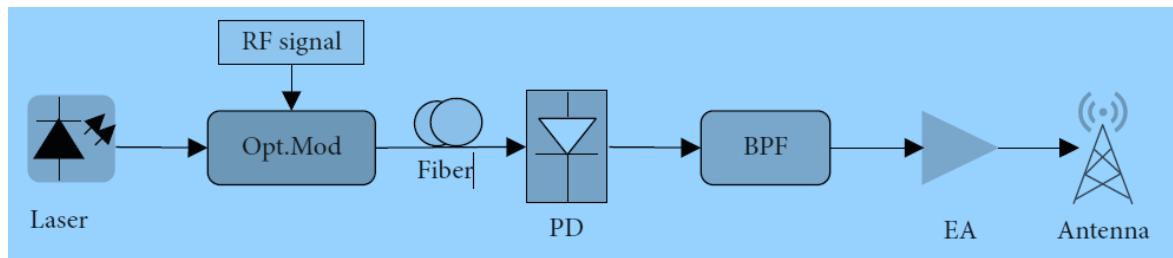


Рис.2.2. Структурна схема формування радіосигналу методом зовнішньої модуляції

Схема зовнішньої модуляції використовує з'єднання між лазерним джерелом та зовнішнім модулятором для генерування сигналу ММД. Електричний радіочастотний сигнал керує зовнішнім модулятором для створення оптичної смуги, що несе інформацію. В зовнішньому модуляторі формуються домени або биття оптичних хвиль, відстань між якими відповідає довжині радіохвилі, і таки чином на виході фотодетектора формується електричний змінний струм з радіочастотою. Зазвичай один модулятор обмежений низькою частотою керуючого електронного сигналу і недостатньою смугою пропускання оптичного пристрою, тому в схемі із зовнішньої модуляції може використовувати декілька модуляторів у поєднанні з технологією множення частоти для генерації сигналів ММД та вище.

На рис.2.3 показано схему каскаду декількох зовнішніх модуляторів, де дані модулюються оптичним модулятором для створення сигналу основної смуги частот.

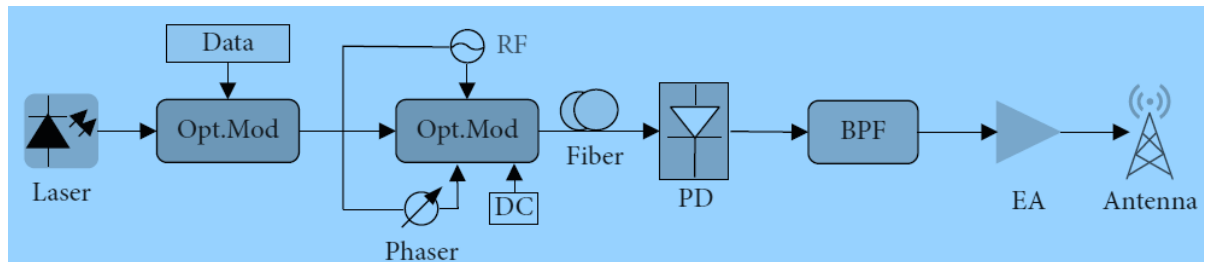


Рис.2.3. Схема каскаду декількох зовнішніх модуляторів

Потім у другому оптичному модуляторі постійна напруга зсуву підбирається так, щоб можна було отримати майже лінійну модуляцію оптичної інтенсивності радіочастотним сигналом РЧ для створення оптичної бічної смуги, що несе дані. Незважаючи на складну структуру та більш високу вартість кількох схем модулятора, він може генерувати стабільні високочастотні радіохвилі та більше не обмежується форматом модуляції порівняно з одним модулятором.

На відміну від описаної вище схеми з однією зовнішньою модуляцією, схема з кількома модуляторами не вимагає попереднього кодування при генерації векторного сигналу ММД.

Оптичний гетеродин. Крім схем з прямою модуляцією лазера та зовнішньої модуляції, оптична гетеродинна модуляція також є ефективним методом генерації високочастотних радіосигналів. Схема отримання частот гетеродинних биття показана рис.2.4.

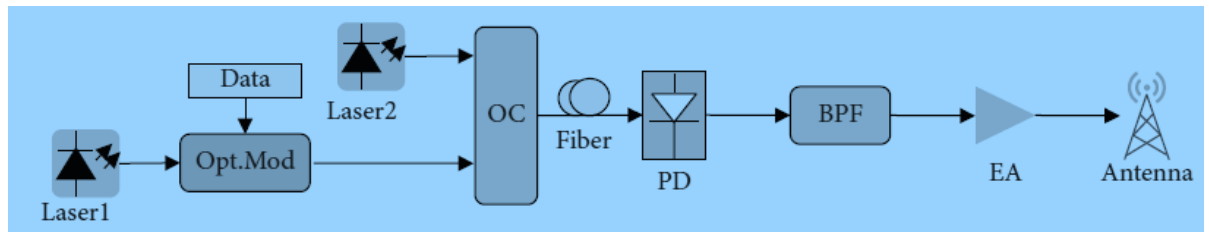


Рис.2.4. Схема формування частот за допомогою гетеродинного биття оптичних хвиль

Модульований сигнал надходить у фотодетектор разом із оптичним сигналом, випромінюваним незалежним лазером. Накладання двох полів сигналів від двох незалежних лазерів з близькими частотами, різниця між якими відповідає частоті радіосигналу, використовується для утворення биттів, що у фотодетекторі перетворюються в електричний сигнал. Основна ідея в тому, що частота биття оптичного гетеродина відповідає частоті сигналу ММД. Нижче наводиться теоретичний аналіз схеми.

Передбачається, що оптичні сигнали, що виводяться двома лазерами, можуть бути виражені як

$$\begin{aligned} E_1(t) &= A_1 \exp[j2\pi f_1 t + j\theta_1(t)] \\ E_2(t) &= A_2 \exp[j2\pi f_2 t + j\theta_2(t)] \end{aligned} \quad (2.1)$$

де A_1 і A_2 , відповідно, являють собою амплітуду два оптичні сигнали. f_1 та f_2 представляють частоту оптичного сигналу. $\theta_1(t)$ і $\theta_2(t)$, відповідно, подають інформацію про початкову фазу кожного лазера. Після того, як інформація про дані модулюється лазером 1, оптичний сигнал може бути виражений як

$$E_s(t) = A_1 [I(t) + jQ(t)] \exp[j2\pi f_1 t + j\theta_1(t)] \quad (2.2)$$

де $I(t) + jQ(t)$ являє собою модульований векторний сигнал основної смуги, де два оптичних сигнали потім поєднуються в сигнал основної частоти, який виражається як

$$E(t) = \frac{A_1[I(t)+jQ(t)] \exp[j2\pi f_1 t + j\theta_1(t)] + A_2[I(t)+jQ(t)] \exp[j2\pi f_2 t + j\theta_2(t)]}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

На виході фотодіоду фотострум, створений двома биттями, можна виразити як

$$I(t) = R|E(t)|^2 = RA_1^2 [I^2(t) + Q^2(t)] + RA_1^2 + 2RA_1A_2I(t) \sin\{2\pi(f_1 - f_2)t + [\theta_1(t) + \theta_2(t)]\} + 2RA_1A_2I(t) \cos\{2\pi(f_1 - f_2)t + [\theta_1(t) + \theta_2(t)]\} \quad (2.4)$$

де R позначає чутливість PD, а рівняння (1. 4) може бути спрощено як :

$$I(t) = RA_1^2[I^2(t) + Q^2(t)] + RA_2^2 + 2RA_1A_2\{I(t) \sin[2\pi f_\Delta t + \theta_\Delta(t)] + Q(t) \cos[2\pi f_\Delta t + \theta_\Delta(t)]\} \quad (2.5)$$

де f_Δ - різниця між f_1 та f_2 . $\theta_\Delta(t)$ - різниця між $\theta_1(t)$ та $\theta_2(t)$. З рівняння (2.5) видно, що два члени поточного виразу є складовими постійного струму. Останній пункт - необхідна інформація про міліметрові хвилі. Необхідну частоту можна отримати, керуючи різницею оптичних частот двох лазерів. Оптична гетеродинна схема має переваги простої конструкції, невисокої вартості та гнучкості генерації міліметрового діапазону хвиль. Однак у цій схемі незалежні джерела світла викликають частотний дрейф та фазовий шум. З аналізу схем трьох схем генерації міліметрового діапазону наведені висновки.

1. Некогерентні методи понижуючого перетворення (оптичного змішування), що використовуються в системі з технологією RoF для 60 ГГц, найменше піддаються впливу фазового шуму лазерів як коригованих по частоті, так і не коригованих лазерів.

2. Методи оптичного гетеродина дозволяють конвертувати радіосигнали у волоконно-оптичне середовище у всьому субміліметровому діапазоні (до 1 ТГц) без істотних обмежень, проте для зворотної генерації радіосигналів у відкритих системах головним обмежуючим фактором є смуга пропускання фотодіода.

3. Методи зовнішньої модуляції на основі оптоелектронних модуляторів шляхом множення частоти вхідного радіочастотного сигналу RF дозволяють генерувати сигнали міліметрового діапазону до 100 ГГц (теоретично до 160 ГГц) з подальшою передачею по оптоволокну.

4. Для оптоелектронних методів формування та передачі сигналів міліметрового та субміліметрового діапазонів довжин хвиль перспективним рішенням є застосування лазерів із налаштуванням за частотою на основі ефекту вимушеного розсіювання Бріллюена.

5. Домінуючим джерелом шумів оптичної лінії є RIN відносна інтенсивність шуму лазера; методами інтеграції модуляторів ММЦ забезпечується вирівнювання оптичної потужності; ММЦ накладає основні обмеження динамічні параметри системи; практичні обмеження також вносить фотодетектор.

7. З аналізу експериментальних даних хроматична дисперсія у стандартному одномодовому волокні не призводить до значного збільшення фазового шуму при ширині спектральної лінії оптичного джерела в межах 50 МГц та довжині магістралі до 50 км.

2.2.3 Генерація векторних сигналів ММД на основі лазерів з прямою модуляцією

Принцип генерації векторного мм-хвилі SSB або DSB за технологією DML показаний на рис.2.5.

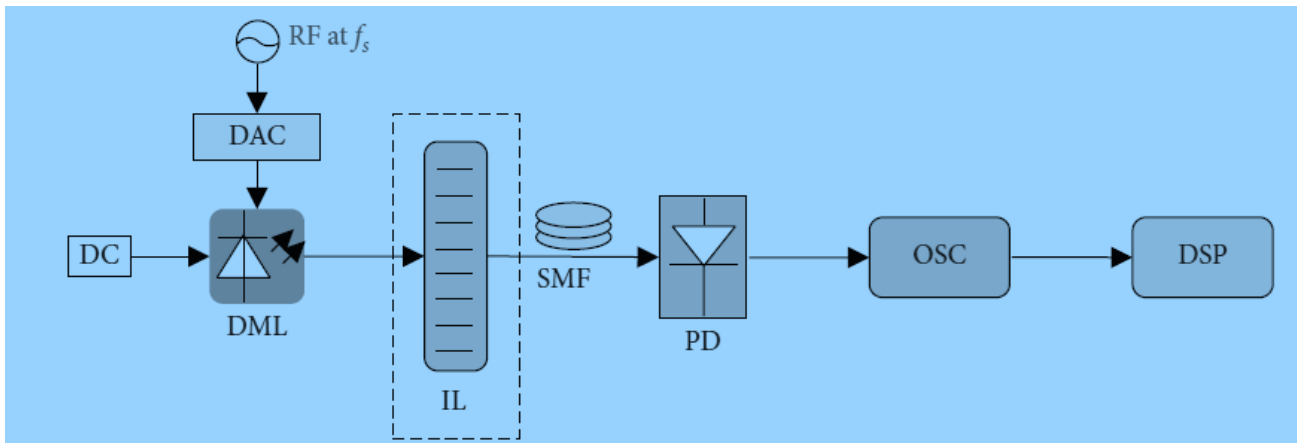


Рис.2.5. Схема генерації векторного сигналу ММД. ЦАП, цифро-аналоговий перетворювач; ІЛ -перемежувач; SMF -одномодове волокно; OSC, осцилограф

Передбачається, що вихід лазерної біжучої хвилі DML виражається як

$$E(t) = A(t)e^{j\omega_c t}, \quad (2.6)$$

де $A(t)$ — амплітуда біжучої хвилі, електричний векторний РЧ-сигнал приводу, згенерований на автономному кінці з частотою на f_s , може бути виражений як

$$V_m(t) = V_m \cos(\omega_f t), \quad (2.7)$$

де V_m і ω_f відповідно представляють амплітуду і фазовий кут керуючого сигналу. Сигнал приводу потім перетворюється в ЦАП та його вихідну форму можна виразити як

$$E(t) = \frac{a}{2} e^{j\omega_c t} \times \langle \exp \left\{ j \left[\frac{\pi}{V_\pi} V_1 \cos(\omega_f t) \right] \right\} + \exp \left\{ j \frac{\pi}{V_\pi} [V_{DC} + V_2 \cos(\omega_f t + \theta)] \right\} \rangle = A(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \exp \{ j [(\omega_c + k\omega_m)t + \varphi_k] \}, \quad (2.8)$$

де α – втрати потужності сигналу.

Вихідну потужність сигналу з двома бічними смугами можна виразити як

$$E_{DSB}(t) \approx \frac{\alpha}{2} A(t) \left\{ \sqrt{1 + J_0^2(m_h)} e^{j[\omega_c t + \arctan J_0(m_h)]} + J_1(m_h) e^{j[(\omega_c + \omega_t)t + (\pi/2)]} + J_1(m_h) e^{j[(\omega_c - \omega_t)t + (\pi/2)]} \right\}, \quad (2.9)$$

де $m_h = (\pi V_h / V_\pi)$, а V_h і V_π – напруги радіочастотного сигналу приводу та півхвильова напруга відповідно, J — функція Бесселя першого роду (рис.2.6).

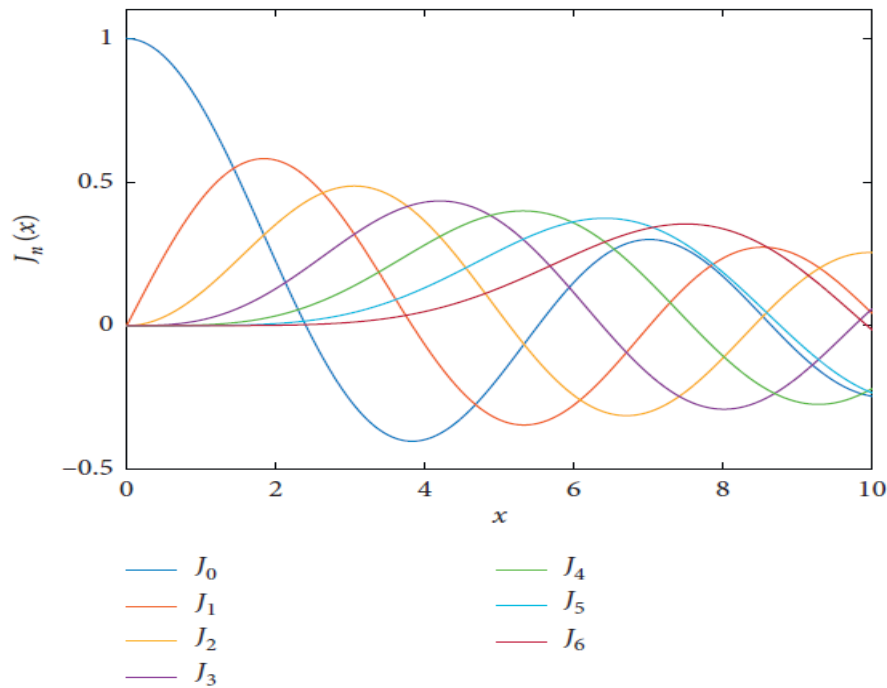


Рис.2.6. Графік функції Бесселя першого роду

Вихідну потужність односмугового сигналу можна виразити як

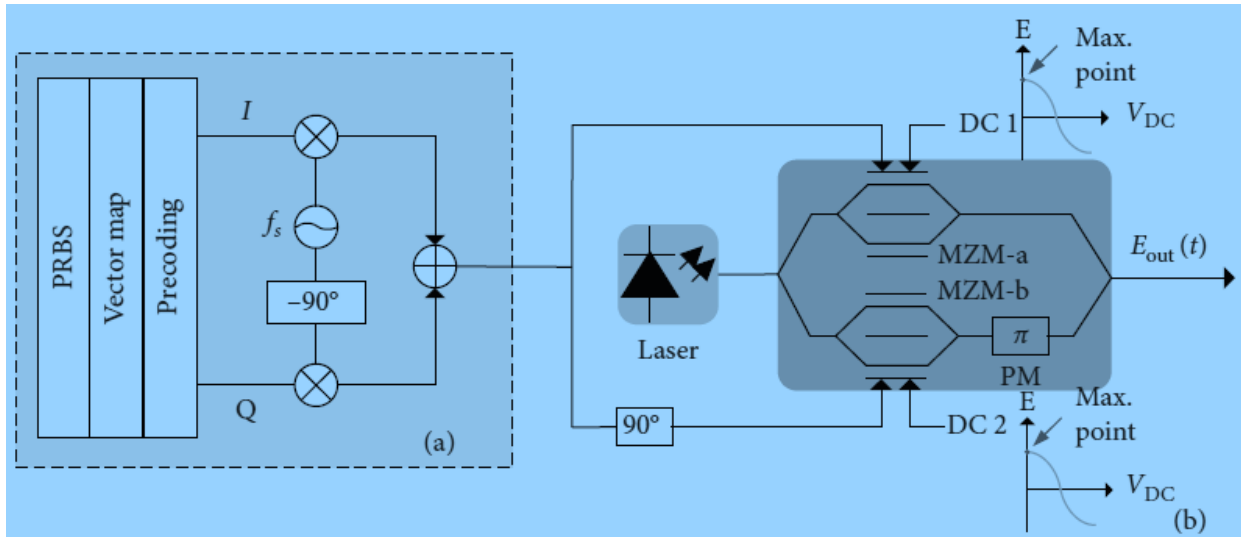
$$E_{SSB}(t) \approx \frac{\alpha}{2} A(t) \left\{ \sqrt{2} J_0(m_h) e^{j(\omega_c t + (\pi/4))} + 2 J_1(m_h) e^{j[(\omega_c + \omega_f)t + (\pi/2)]} \right\}. \quad (2.10)$$

Такий модульований сигнал передається на через одномодове волокно.

Сигнал ММД нормального електричного вектора може бути отриманий в автономному режимі прямої модуляції.

2.2.4 Генерація векторних сигналів на основі зовнішньої модуляції

Векторні сигнали міліметрової хвилі з придушенням несучої можна генерувати двоелектродним модулятором Маха–Цендера, принципова схема його показана на рис.2.7.



Ри.2.7. Схема генерації фотонного векторного сигналу ММД: а) Блок-схема автономної генерації векторного сигналу; PRBS, псевдовипадкова двійкова послідовність; б) Принцип генерації векторного сигналу міліметрового діапазону

Потужність лазера може бути виражена таким чином:

$$E_{in} = E_0 \cos(\omega_0 t), \quad (2.11)$$

де E_0 і ω_0 відповідно являють собою амплітуду та кутову частоту оптичного сигналу. І MZM-a, і MZM-b встановлені у точці максимального зсуву. Електричні векторні сигнали, що проходять через MZM-a та MZM-b, дорівнюють $V_a = V_m \cos[\omega_{RF}t + \theta(t)]$ і $V_b = V_m \cos[\omega_{RF}t + \theta(t) + (\pi/2)]$, відповідно. V_m являє собою амплітуду векторного електричного сигналу, а $\theta(t)$ являє собою фазу, ω_{RF} є центральною частотою ВЧ-сигналу збудження. Після того, як вихідний сигнал MZM-b зміщується на 180° по фазі, оптичний сигнал, що генерується разом з MZM-a, може бути виражений як

$$E_{out} = -E_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_{4n-2}[m(t)] (\cos\{[\omega_0 - (4n - 2)\omega_{RF}]t - 2\theta(t)\} + \cos\{[\omega_0 + (4n - 2)\omega_{RF}]t + 2\theta(t)\}) \quad (2.12)$$

де $m(t)$ означає індекс модуляції.

В межах ефективного діапазону, ігноруючи оптичну бічну смугу вищого порядку, більшу за J_2 , рівняння (12) можна спростити як

$$E_{out} = -E_0 J_2[m(t)] \{ \cos[(\omega_0 + 2\omega_{RF})t + 2\theta(t)] + J_2[m(t)] \cos[(\omega_0 + 2\omega_{RF})t - 2\theta(t)] \} \quad (2.13)$$

Електричний сигнал, що генерується після перетворення в фотодетекторі, можна виразити як

$$i_{4\omega_{RF}t} = \frac{1}{2} R J_2^2[m(t)] \cos[4\omega_{RF}t + 4\theta(t)] \quad (2.14)$$

Як видно з (1.14) векторний сигнал у чотири рази вище, ніж вхідний сигнал, тобто таким чином отримується векторний сигнал ММД через чотирикратне множення частоти. Перед модуляцією векторний сигнал попередньо закодовують. Взагалі кажучи, для сигналів квадратурної фазової маніпуляції (QPSK) потрібне лише фазове попереднє кодування. Для сигналів з багаторівневою квадратурною амплітудною модуляцією (M-QAM) необхідні як амплітудне, так і фазове попереднє кодування.

Генерація багаточастотних векторних сигналів на основі модулятора Маха-Цендера (MZM). З експериментальних даних генерування сигналів ММД з декількома частотами та відповідною величиною потужністю шляхом вибору сигналу бічної смуги за допомогою селективного фільтра довжин хвилі (WSS) [40]. Його принципова схема показана на рис.1.8. Якщо модулятор MZM працює в режимі придушення несучої, модульовані оптичні сигнали мають форму:

$$E_{MZM}(t) = 2K_1 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{2n}(k) \exp[j2\pi(f_c + 2nf_s)t + j2n\varphi(t)] \quad (2.15)$$

де K_1 — константа. $J_{2n}(k)$ — функція Бесселя 2-го порядку.

Зображення функції Бесселя 2-го порядку показано на рис.2.9. k – індекс модуляції.

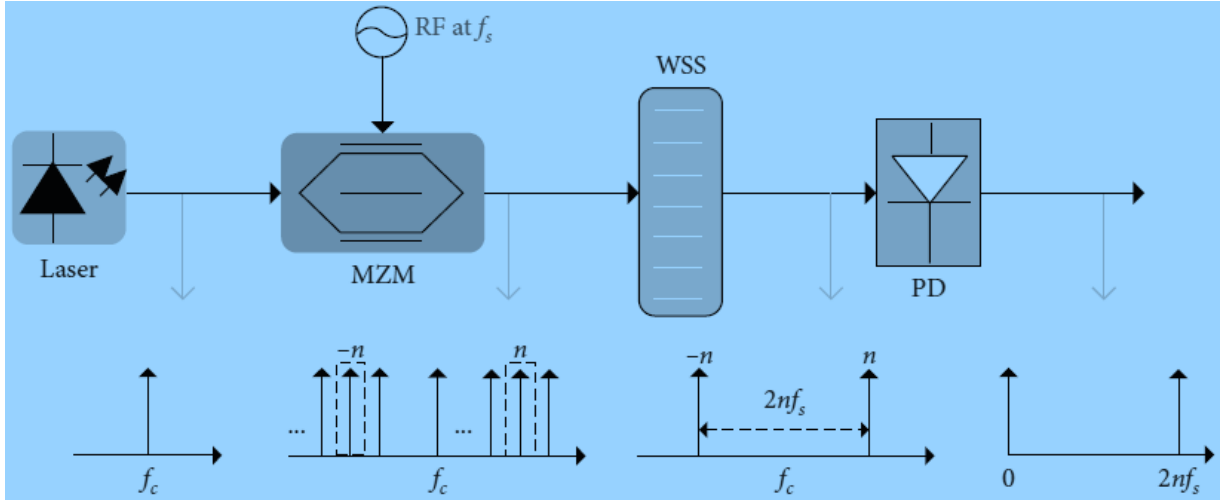


Рис.2.8. Схема багаточастотного режиму генерації векторного сигналу ММД

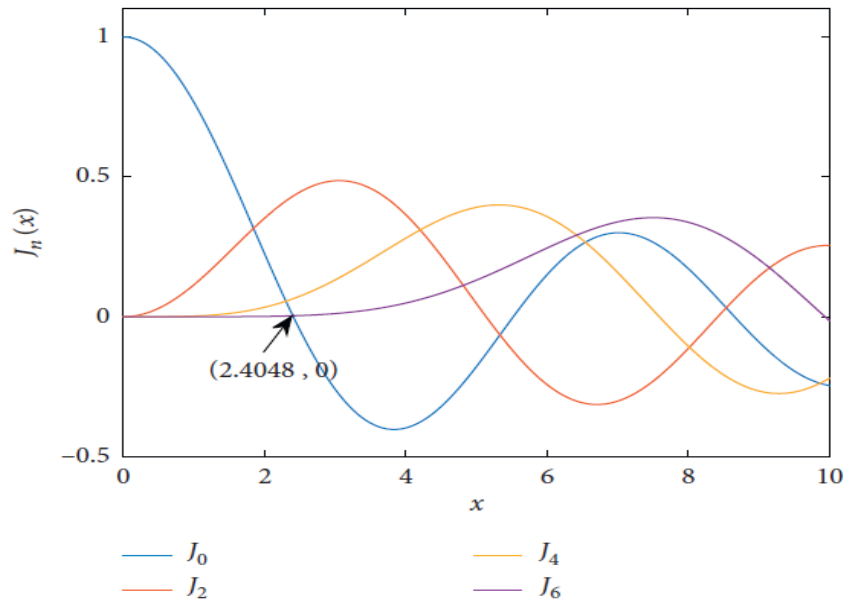


Рис.2.9. Графік функції Бесселя другого порядку $2n$

Як бачимо з рис.2.9, коли k збільшується від 0 до 3, числове значення J_0 продовжує зменшуватися, а значення J_2, J_4 і J_6 продовжують збільшуватися. Коли k встановлено на 2,4048, J_0 переходить до 0. Іншими словами, напруга, модульована MZM, встановлюється на максимальну точку. При цьому центральна несуча пригнічується. Інші піднесучі більше 2-го порядку можна ігнорувати, тому на виході MZM є дві піднесучі другого порядку. Рівняння (2.15) можна спростити як

$$E_{MZM}(t) \approx 2K_1 J_2(k) \{ \exp[j2\pi(f_c + 2f_s)t + j2\varphi(t)] + \exp[j2\pi(f_c - 2f_s)t - j2\varphi(t)] \} \quad (2.16)$$

Радіочастотний сигнал може бути виражений таким чином:

$$i_{RF}(t) = \frac{1}{2} R J_2^2(k) \cos[2\pi \cdot 4f_s t + 4\varphi(t)]. \quad (2.17)$$

З рівняння (1.17) можна отримати, що частота радіочастотного сигналу в 4 рази більше, ніж сигналу збудження. Однак, фаза зміниться сигналу зміниться після виявлення квадратично модульованих сигналів. Нормальні векторні сигнали ММД можна отримати методом попереднього кодування.

$$E_{PM}(t) = K_1 \exp[j2\pi f_c t + j\varphi(t) + j\pi V_{RF}(t)/V_\pi] = K_1 \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(k) \exp[j2\pi(f_c + n f_s)t + jn\theta(t) + j\varphi(t)] \quad (2.18)$$

Генерація багаточастотного вектора ММД на основі фазового модулятора (РМ). Порівняно з вищеприведеним модулятором інтенсивності або MZM, РМ має менші втрати, що вносяться. Це призводить до більш високого відношення оптичний сигнал/шум (OSNR) для створюваного оптичного сигналу. І його стабільність краща, тому що немає зміщення постійного струму. На рис.2.10 показано принципову схему генерації багаточастотний векторний сигнал ММД на основі ФМ та попереднього кодування. Генеруються векторні сигнали

автономного попереднього кодування із частотою f_s , включаючи PRBS (псевдовипадкова двійкова послідовність), попереднє кодування, фільтр нижніх частот та цифрове перетворення з підвищенням частоти. Вихідний сигнал модулятора ФМ можна подати так:

$$E_{WSS}(t) = -K_1 J_2(k) \{ \exp[j2\pi(f_c + 2f_s)t + j2\theta(t) + j\varphi(t)] + \exp[j2\pi(f_c - 2f_s)t - j2\theta(t) + j\varphi(t)] \}. \quad (2.19)$$

Сигнал, вибраний WSS, генерує векторний міліметровий сигнал $4f_s$ із частотою $4f_s$ через биття часткових розрядів. Його поточне значення може бути виражене як (крім складової постійного струму)

$$i_{RD}(t) = \frac{1}{2} R J_2^2(k) \cos[2\pi \cdot 4f_s t + 4\theta(t)] \quad (2.20)$$

Випадковий фазовий шум усувається, оскільки два оптичні несучі другого порядку від одного і того ж лазерного джерела синхронізовані по фазі з синхронізацією частоти. Однак ефект дисперсії оптичного волокна знижує узгодженість двох оптичних несучих другого порядку. Отже, випадковий фазовий шум не можна усунути. Ефективність генерованої міліметрової хвилі знижується. Крім того, щоб гарантувати, що згенерований векторний сигнал ММД з частотою $4f_s$ може отримати стандартний формат модуляції, параметри повинні бути відрегульовані так, щоб амплітудний член $J_{22}(n)$ і фазовий член $\theta(t)$ відповідали формату векторної модуляції.

Грунтуючись на спільній дії фазового модулятора та WSS, цей метод теоретично може генерувати векторні сигнали ММД в багаточастотному режимі. Експериментально також було успішно згенеровано триразовий оптичний векторний сигнал ММД на основі цього методу. Використовуючи селективним фільтром WSS для вибору вихідного сигналу несучою фазовим модулятором, дві

піднесучі мають кілька різних асиметричних комбінацій, таких як $(-3, 0)$, $(-2, 1)$, $(-1, 2)$ і $(0, 3)$. Таким чином, можливо генерувати методом 5-го множення векторний сигнал ММД. WSS вибирає гармоніки оптичної несучої порядку -1 і $+4$.

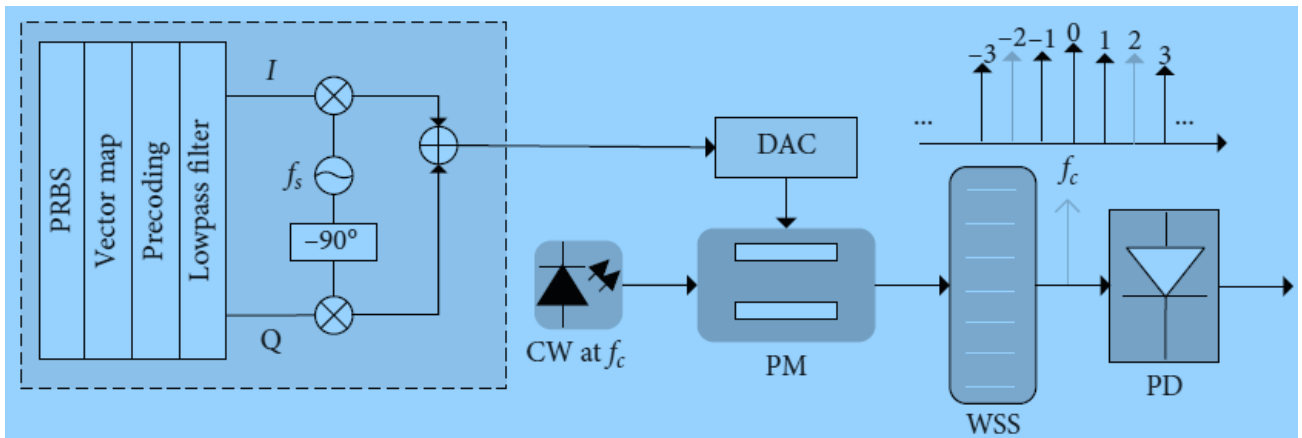


Рис.2.10. Схема генерації багаточастотного векторного сигналу

2.3 Структура системи передачі великої потужності

Нижче наведено кілька методів і структур для досягнення передачі великої ємності на основі мережевих систем RoF.

Оптичне мультиплексування з поляризаційним поділом у поєднанні з MIMO має дуже хорошу характеристику пропускання в системі оптичного зв'язку. Технологія поляризаційного мультиплексування може подвоїти потужність передачі системи. В даний час технологія мультиплексування з оптичною поляризацією (PDM) дуже зріла. Через зрілість оптичної технології PDM багато дослідників намагаються поєднати її з технологією Multiple-Input Multiple- Output (MIMO), щоб реалізувати передачу даних надвеликої ємності. Блок-схема реалізації цієї технології показана на рис.2.11., яка складається з оптичного передавача основної смуги, оптичного гетеродинного перетворювача

з підвищенням, антен радіосигналу і бездротового приймача сигналу ММД. Основною функцією передавача є формування сигналів PDM оптичної модуляції. Сигнал формується поляризаційним мультиплексором. Сигнал, що передається на мультиплексор з поляризаційним поділом, посилається модулятором. Тут модулятор керується електронними даними від передавача.

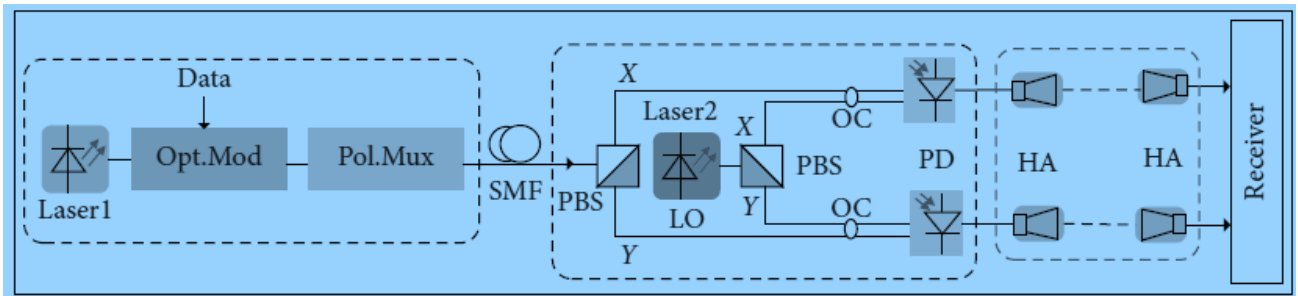


Рис.2.11. Структурна схема оптичного PDM в поєднанні з МІМО. Pol.Mux - поляризаційний мультиплексор; LO - гетеродин; HA - рупорна антена

Принцип поляризаційних мультиплексорів: оптичний сигнал PDM передається до оптичного гетеродинного перетворювача з підвищенням частоти за допомогою оптичного волокна. Основна робота цієї частини полягає в перетворенні сигналу основної смуги, надісланого передавачем, у сигнал діапазону частот ММД. На рис.2.11 різниця оптичної частоти між частотою LO та основною смугою сигналу центральної частоти ММД. Поляризаційний подільник променів (PBS) і OC використовуються для отримання поляризованих когерентних сигналів міліметрової хвилі в напрямках X і Y після перетворення з підвищенням за допомогою фотодіоду. У частині бездротового з'єднання є дві антени з кожного боку для формування бездротового зв'язку МІМО 2×2 . На приймачі сигнали повинні бути перетворені в сигнал основної смуги за допомогою перетворення з пониженням частоти і, нарешті, відправлені в частину обробки цифрового сигналу, де сигнал оптимізується для зменшення BER і підвищення продуктивності передачі системи.

Детальний принцип роботи оптичної частини передавача та основні характеристики передачі MIMO описаний нижче. На передавачі лазер генерує безперервну хвилю (CW), яка потім модулюється через I/Q модулятор. Генератор довільної форми сигналу (AWG) генерує потрібний сигнал модуляції, який посилюється EA для керування I/Q-модулятором. Оптична PDM техніка реалізована мультиплексором. Мультиплексор з поляризаційним поділом містить ОС для поділу сигналу на дві гілки, лінію затримки (DL) для забезпечення затримки символу та аттенюатор (ATT) для балансування потужності двох гілок. Два сигнали рекомбінуються в один сигнал через PBS і передаються на віддалену базову станцію через SMF. На рис.2.12 представлена принципова схема частини оптичного передавача основної смуги.

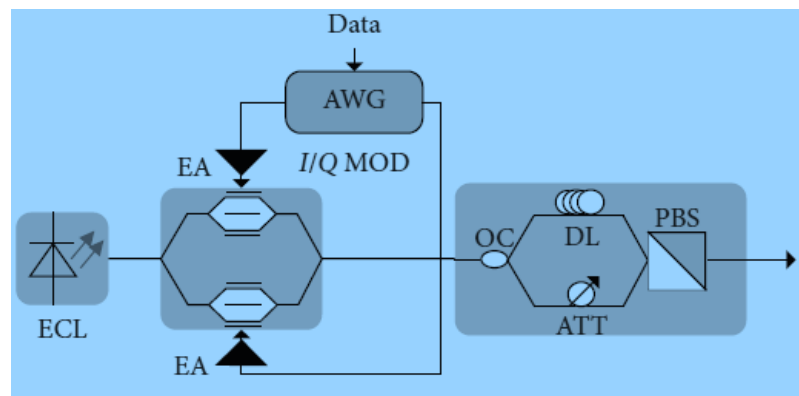


Рис.2.12. Принципова схема оптичного передавача основної смуги

Крім того, ми також представили принцип частини з'єднання MIMO, і його можна коротко описати таким чином

$$\begin{pmatrix} r_x \\ r_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{xx} & H_{yx} \\ H_{xy} & H_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

де $(r_x \ r_y)^T$ – бездротова передача сигналу, отриманий сигнал $(s_x \ s_y)^T$ сигнальний, $(n_x \ n_y)^T$ позначає шум. Перший доданок(2.21) можна описати як:

$$\begin{pmatrix} H_{xx} & H_{yx} \\ H_{xy} & H_{yy} \end{pmatrix} = H_{fiber} \cdot H_{wireless} = \begin{pmatrix} m_{xx} & m_{yx} \\ m_{xy} & m_{yy} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{xx} & h_{yx} \\ h_{xy} & h_{yy} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

де два елементи у правій частині рівняння - це елементи передачі Джонса у волоконно-оптичних та бездротових лініях зв'язку. Було успішно підтверджено передачу по мережі ROF зі швидкістю 5 Гбіт/с на основі PDM та MIMO. У підтверджується можливість передачі інформаційних даних зі швидкістю 224 Гбіт/с.

2.4 Розширена багаторівнева модуляція

Оптоволоконна безпроводова мережева система, заснована на комбінації оптичного прийому PDM і MIMO, може реалізувати передачу даних надвеликої ємності, але її верхня межа набагато більша за це. Добре відомо, що модуляція I/Q високого порядку (така як M-QAM) використовується підвищення ефективності використання спектра.

Таким чином, у частині передавача сигналу, коли сигнал розширеної багаторівневої модуляції модулюється на I/Q-модуляторі, пропускна здатність мережної системи ROF на основі комбінації оптичного PDM та MIMO може бути збільшена у кілька разів. Оскільки принцип аналогічний принципу, описаному в попередньому розділі, ми тут не вдаватимемося в подробиці.

Крім того, необхідно ввести DSP частину ресивера. Порівняно з АЦП та основним алгоритмом DSP (цифрова обробка сигналів) з попереднього розділу алгоритм DSP цієї структури частково складний. Після перетворення сигналу АЦП два сигнали (стану поляризації X і Y) відновлюються одним і тим самим алгоритмом DSP. Перетворений сигнал перетворюється на сигнал основної смуги частот шляхом подвійної повторної дискретизації та миттєвого перетворення зі зниженням частоти. Для відновлення сигналу використовується серія класичних алгоритмів.

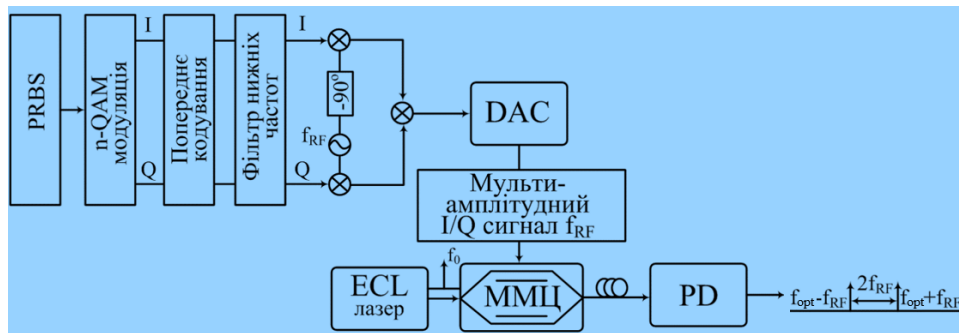


Рис.2.13. Схема формування та передачі квадратурно модульованого сигналу ММД, DAC - цифро-аналоговий перетворювач

Вони включають відновлення тактової частоти, класичний алгоритм постійного модуля (СМА), компенсацію зсуву частоти та відновлення фази. Після серії виправлень порівняння BER виконуються диференційним декодуванням.

Оптична модуляція на кількох несучих. Всі перераховані вище ефективні методи, засновані на оптичній модуляції з однією несучою, в той час як оптична модуляція з декількома несучими може ефективно знизити швидкість передачі даних за тих же умов. Він також може реалізувати передачу даних із надвеликою пропускною здатністю. На рис.2.14 показана схематична діаграма комбінації модуляції з декількома несучими системи мережі передачі RoF.

Як показано на рис.2.14, система подібна до мультиплексування за розподілом по довжині хвилі (DWDM), і її принцип пояснюється трьома оптичними каналами несучою у поєднанні з технологією придушення оптичної несучої (OSC). Тут сигнал із трьома несучими, відправлений передавачем, ділиться на два канали після проходження через поляризатор BPS. Лазер Laser2 забезпечує частоту гетеродина для отримання биття частоти або гетеродина для формування сигналів міліметрового діапазону.

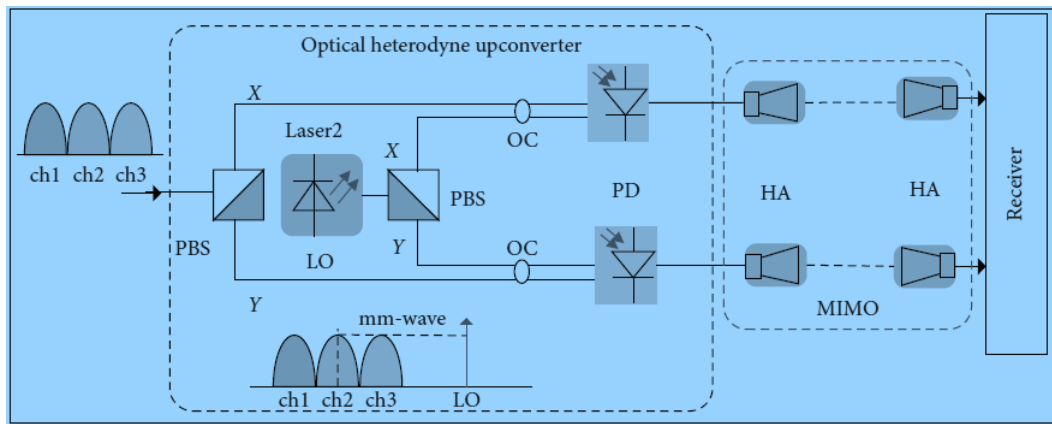


Рис.2.14. Принципова схема комбінації модуляції з багатьма несучими для волоконно-оптичної бездротової мережі передачі

Нижче описується принцип генерації сигналу з трьома несучими. Принципова схема оптичного передавача основної лінії частот показана рис.2.15.

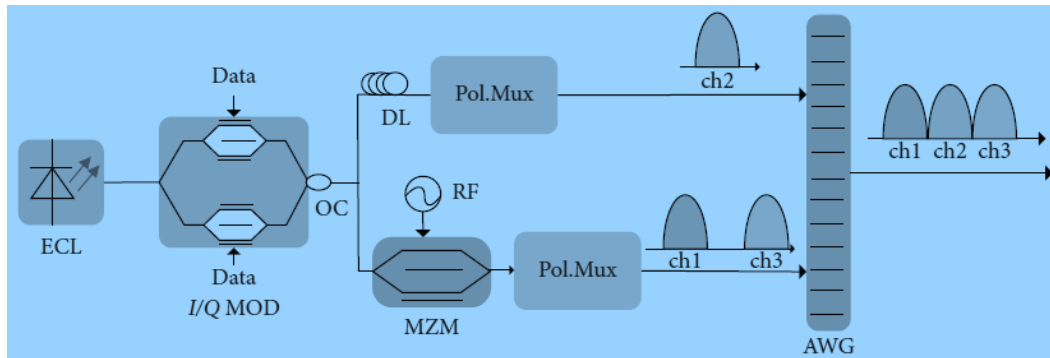


Рис.2.15. Схема формування оптичного сигналу з багатьма несучими

Після проходження через I/Q-модулятор електричний сигнал поділяється на дві частини за допомогою ОС. Один маршрут здійснює корисний сигнал через поляризаційний мультиплексор, а інший модулюється модулятором MZM, який керується радіочастотним сигналом і зміщенням у нуль для досягнення пригнічення оптичної несучої. Після придушення сигналу через поляризаційний мультиплексор, де сигнали проходять через генератор довільної форми (AWG), а потім передаються через одномодове волокно SMF. Варто відзначити, що

наступні частини DSP (цифрова обробка сигналів) системи оптичної модуляції з декількома несучими для зовнішнього інтерфейсу потрібно демультимплексування каналів.

2.5 Формування поляризаційного мультимплексування в антені

Різні схеми модуляції по оптоволоконним каналам вже здатні передавати величезні обсяги даних. Загалом, антени, які зазвичай використовуються в високочастотній області, демонструватимуть велику або невелику поляризацію (звичайно розуміється як напрямок електричного поля), а антена може підвищити ефективність передачі інформації за рахунок посилення. Але є інший вихід: покращити пропускну здатність за рахунок поляризації антени. На рис.2.16 показано принципову схему системи антенного поляризаційного мультимплексування.

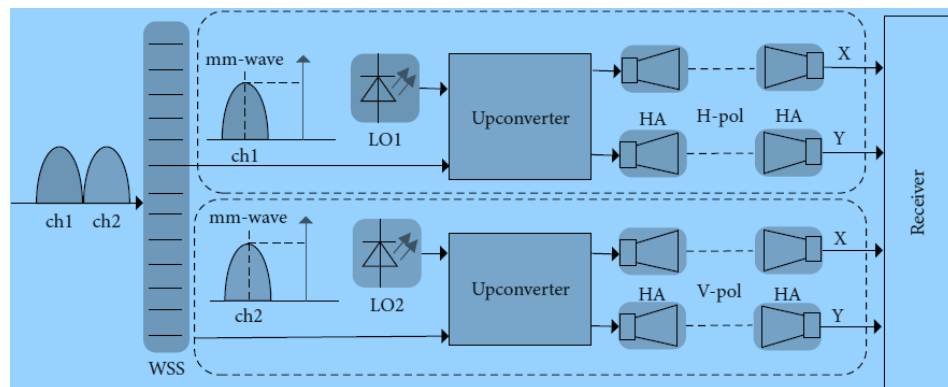


Рис. 2.16. Схема формування поляризаційного мультимплексування в антені

Є два стани поляризації антени, а саме Е-поляризація та Н-поляризація, які більшість людей називають горизонтальною поляризацією (H-pol) та вертикальною поляризацією (V-pol). Бездротовий зв'язок MIMO на рис.2.16 складається з чотирьох передаючих антен і чотирьох приймальних антен. Його

можна розділити на дві частини, одна з яких налаштована як горизонтальна поляризація для формування масиву НА з Н-поляризацією передачі ch1, а інша - для формування масиву НА з V-поляризацією передачі ch2. Варто зазначити, що сигнали, прийняті приймальною антеною, повинні бути надіслані OSC, а потім відновлені і оптимізовані послідовністю частин DSP після ADC. На рис.2.17 показано схему формування діаграми антени з поляризаційним мультиплексуванням.

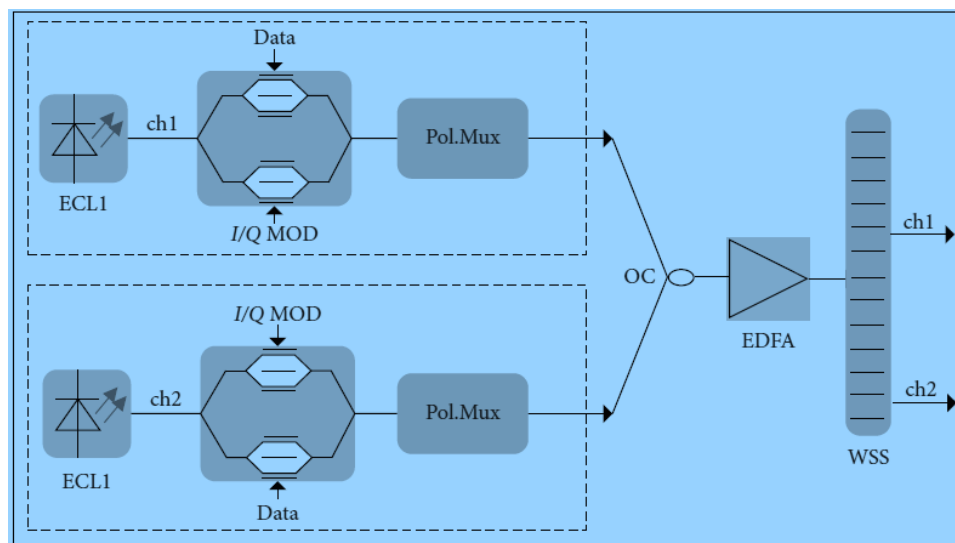


Рис.2.17. Схема формування діаграми антени з поляризаційним мультиплексуванням

Частина генерації сигналу, як і раніше, аналогічна принципу, показаному вище. Тут додається додатковий еквівалент фільтру частотного WSS поляризаційний фільтр BPS для вибору ширини смуги спектра сигналу. Після вибору частотного фільтру WSS сигнал подається гетеродином для зміни частоти та генерації модульованих сигналів. На початку цієї статті описується потреба людей у високошвидкісному широкосмуговому зв'язку та високій пропускній здатності, а потім вводиться центральна тема волоконно-оптичної радіомережі. Представлена структура мережної системи RoF має переваги для

високочастотної передачі сигналів міліметрового діапазону. Показана можливість формування декілька форматів модуляції, що генерують смугу частот міліметрового діапазону на основі RoF на основі фотонної технології. На основі цих схем модуляції розглянуто кілька методів генерації багаточастотних векторних сигналів міліметрового діапазону. Нарешті, на основі форматів модуляції, згаданих вище, перераховано кілька вдосконалених дуже складних методів та структур для реалізації передачі даних з дуже великою пропускнуою здатністю. Мережева система продовжить залишатися актуальною темою для досліджень у майбутніх телекомунікаціях. Завдяки характеристикам широкосмугової та надвисокої швидкості передачі, а також високій гнучкості доступу, його додатки дуже великі. Однак із збільшенням відстані і постійну потребу в збільшенні пропускнуої здатності система для системи передачі RoF потрібне подальше дослідження.

3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ВОЛОКОННО-ЕФІРНИХ МЕРЕЖ ІЗ СУМІСНИМ ВИКОРИСТАННЯМ РАДІО- ТА ОПТИЧНОГО СПЕКТРУ СИГНАЛІВ

Сьогодні найбільш продуктивними за пропускнуою спроможністю є оптоволоконні системи, максимальні експериментальні швидкості становлять сотні Тбіт/с. Тому існують напрямки досліджень у галузі об'єднання різнорідних технологій, у тому числі наземних та позаземних (супутникових, стратосферних) систем зв'язку, волоконно-оптичних магістралей. Комбінування таких технологій з використанням радіо та оптичного діапазону може забезпечити широку смугу пропускання та широке географічне охоплення, незважаючи на дуже великі відстані передачі та сильне згасання на цих частотах. Супутники LEO наступного покоління зможуть надавати високоякісні інтернет-послуги в регіонах, які не охоплені оптоволоконними з'єднаннями. Однак супутникові мережі не повинні конкурувати з наземними мережами, вони повинні взаємодіяти, щоб забезпечити глобальний доступ до Інтернету з максимальною пропускнуою здатністю.

Глобальне супутникове охоплення. Коли відстань між двома наземними інфраструктурами збільшується, зв'язок між пунктами через оптичне волокно може стати занадто дорогим. Сузір'я супутників, де кожен космічний апарат з'єднаний з іншими сусідніми космічними апаратами через міжсупутникові канали, може забезпечити можливість підключення з високою пропускнуою спроможністю до наземних пристроїв шляхом ретрансляції сигналів користувача через космічну мережу.

Супутників, де кожен космічний ретранслятор взаємопов'язаний із сузір'ям супутників, інші сусідні космічні апарати через міжсупутникові лінії зв'язку, можуть забезпечувати підключення високої пропускнуої здатності на землі пристроїв шляхом передачі сигналів користувача через простір накладання

сітчастої мережі супутників та інші повітряні платформи також можуть доповнювати наземні транспортування в щільних регіонах з високим піковим навантаженням на трафік, таким чином досягається балансування навантаження.

Повітряні/космічні платформи мають можливість забезпечити високошвидкісне підключення в той час це сприяє енергоефективності. З другого боку, повітряні платформи як БПЛА, споживаючи незначну енергію для зависання, можуть розгортатися за вимогою, реалізуючи інтелектуальне керування.

3.1 Порівняння ефективності супутникових та волоконно-ефірних систем

Для моделювання розглянемо сценарій, у якому наземний зв'язок доповнюється супутниковими станціями LEO, MEO та GEO, розташованими на різних висотах 300 км; 10 000 км; 36 000 км відповідно до різних кутів елевації 10... 90 градусів. Зв'язок Земля-супутник моделюється на різних частотах f_c , які включають передачі хвиль нижче 6 ГГц, так і міліметрових хвиль, зі смугою пропускання W , яка є функцією частоти f_c : ми встановлюємо $W = 20$ МГц для $f_c \leq 6$ ГГц ($W = 20$ МГц), $6 < f_c \leq 60$ ГГц ($W = 800$ МГц), $60 < f_c \leq 150$ ГГц ($W = 2$ ГГц).

Будемо вважати, що наземні станції оснащені фізично реконфігурованими антенами з коефіцієнтом підсилення $G_{tx} = 43.2$ дБ, а для антен супутникових станцій коефіцієнт посилення G_{tx} коливається від 50 до 80 дБ. Наземні станції оснащені фізично реконфігурованими антенами з коефіцієнтом підсилення $G_{TX} = 43.2$ дБ. Для антен супутникових станцій коефіцієнт посилення G_{TX} коливається 50-80 дБ. У супутникових сценаріях використовуються високоспрямовані антени з високим коефіцієнтом посилення для покриття дуже великих відстаней передачі.

З аналізу показників сигнал/шум (SNR) для каналу зв'язку Земля-супутник, та наземного каналу LTE, між передавачем і приймачем продуктивність досліджуваних архітектур порівнюємо пропускну здатність Шеннона, тобто максимальну досяжну швидкість передачі даних, яка обчислюється як

$$C = W \log_2 (1 + S/N) \quad (4.13)$$

Якщо вимірний SNR нижче попередньо визначеного порога S/N , зв'язок Земля-супутник не може бути встановлений: у цьому випадку ми встановлюємо пропускну здатність Шеннона рівною 0. Також розглядаємо сценарій для наземних мереж, в якому eNB LTE, що працюють на робочій частоті $f_c = 2$ ГГц при ширині смуги $W = 20$ МГц, де за допомогою ізотропної передачі, розгортається передача на відстані між пунктами 200 м, щоб характеризувати різні конфігурації щільності розташування. У цьому випадку канал моделюється, як зазначено в 3GPP TR 36.842.

На рис.3.1 зображена залежність ємності Шеннона C від несучої частоти f_c , підсилення антени на супутниковій станції G_{rx} і висота орбіти супутника h .

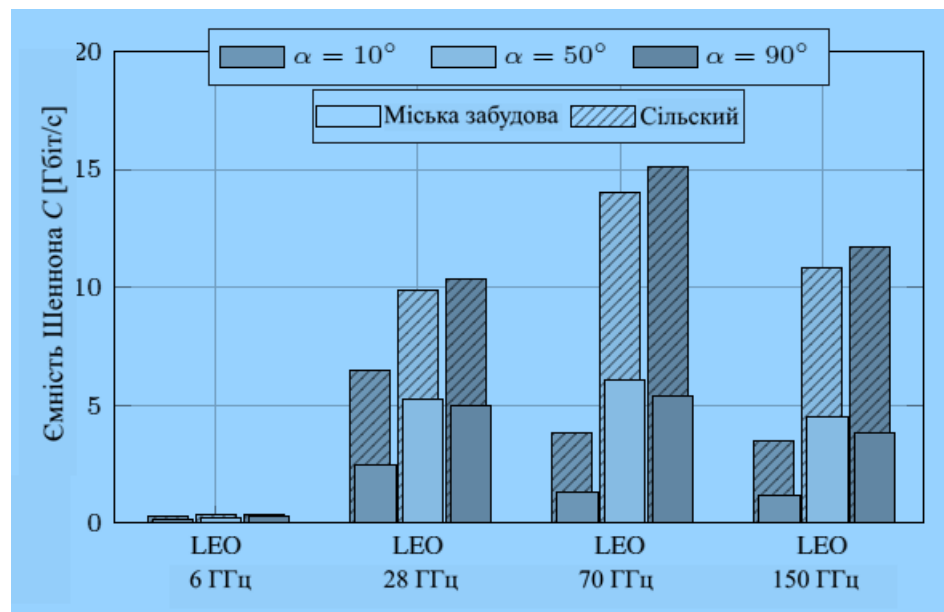


Рис. 3.1. Ємність Шеннона порівняно з сценарієм LEO-GND з $h = 300$ км, з температурою посилення антени до шуму $G_{rx} = T = 15:9$ дБі/К

При заданій висоті розташування супутника(платформи) h і куті місця β , який визначається як кут між напрямком на горизонт і напрямком осі променя антени земної станції на антену стратосферної платформи похила дальність зв'язку (рис.3.2):

$$D = R_3^2 + (R_3 + h)^2 - 2R_3(R_3 + h)\cos\gamma, \quad (3.1)$$

де R_3 - радіус Землі (6378 км), γ - геоцентричний кут, визначається з формули:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\cos\beta}{1+h/R_3}\right) - \beta. \quad (3.2)$$

Для максимальної похилій дальності, при $\beta = 0$:

$$D_{\max} = \sqrt{h(2R_3 + h)}. \quad (3.3)$$

При $\beta = 90^\circ$ мінімальна похила дальність $D_{\min} = h$.

З формул (3.2) і (3.3) може бути обчислений діаметр зони обслуговування без урахування рефракції за формулою:

$$d = R_3 \sqrt{2(1 - \cos\gamma)}, \quad (3.4)$$

коли $\gamma \leq 10^\circ$:

$$d = 2R_3 \cdot \left(\arccos\left[\frac{\cos\beta}{1+h/R_3}\right] - \beta \right) (\text{рад}). \quad (3.5)$$

Траєкторія радіопроменя внаслідок атмосферної рефракції буде згинатися в бік поверхні Землі. Кут рефракції, що представляє собою кут в точці прийому між істинним і уявним напрямком на джерело випромінювання, не залежить від частоти падаючого випромінювання.

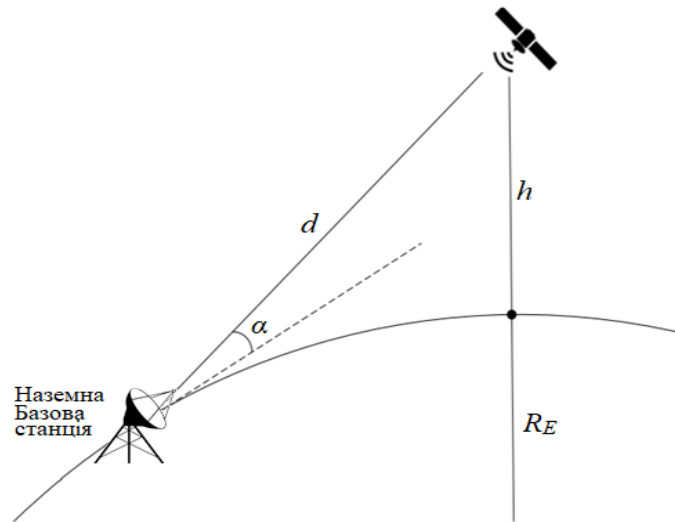


Рис. 3.2. Концепція передачі сигналу між супутником і наземною станцією (BS_E), R_E - радіус Землі, h – висота орбіти супутника, кута елевації, d – відстань між супутником та наземною станцією

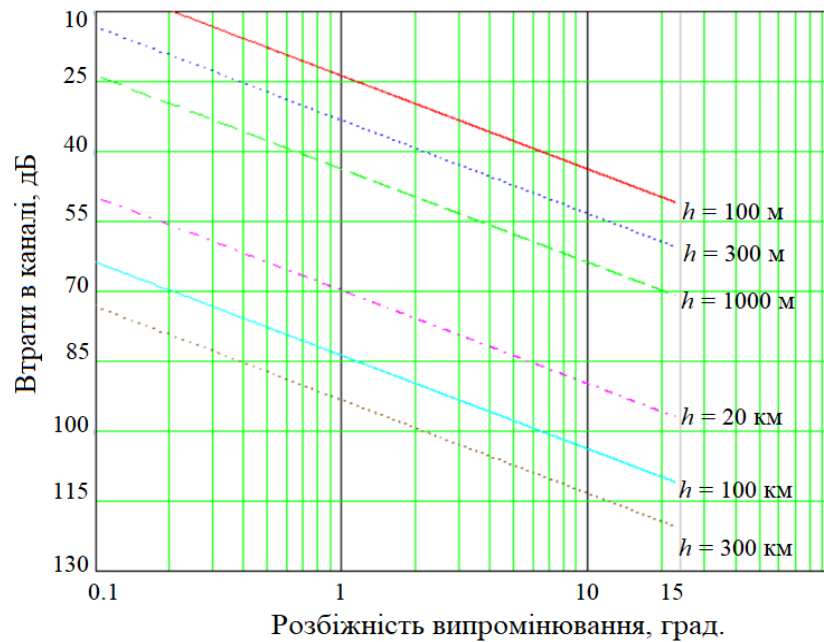


Рис. 3.3. Залежність кута розкриття антени і втрат потужності сигналу, пов'язаних з розбіжністю випромінювання для різних висот h розташування супутника

3.2 Супутниковий зв'язок на міліметрових хвилях

Сигнал між наземного і супутникового станціями згідно 3GPP піддається кількома стадіями загасання, а втрати на трасі (PL -Path Loss) складаються з наступних елементів:

$$PL[dB] = PL_e + PL_b + PL_g + PL_s . \quad (3.6)$$

PL_e – втрати сигналу при переході в приміщення, PL_b – основні втрати сигналу в каналі , PL_g – поглинання сигналу в атмосфері та PL_s – загасання сигналу та тропосферних та іоносферних мерехтіннях.

3.3 Втрати сигналу при переході в приміщення

Супутникове розповсюдження сигналу може здійснюватися в межах прямої видимості (LOS - Line of Sight) або поза прямої видимості (NLOS - Non Line of Sight) з ймовірністю, зазначеної в [3GPP], яка залежить від навколишнього середовища (наприклад, міський чи сільський сценарій) і кута піднесення α . У випадку NLOS-зв'язку з внутрішнім наземним терміналом, 3GPP також визначає втрати на вході в будівлю (PL_e – Building Entry Loss) у формі функції розподілу ймовірності p того, що дана втрат не буде перевищена, і визначається як:

$$PL_e(p) = 10\log_{10}(10^{0.1A} + 10^{0.1B} + 10^{0.1C}), \quad (3.7)$$

В (4.7) параметри A , B і C залежать від робочої частоти f_c , типу забудівлі, місця розташування всередині будівлі і руху в будівлі, як описано в [3GPP].

3.4 Основні втрати на трасі

Основні втрати на трасі враховують поширення сигналу у вільному просторі (FSPL - Free Space Propagation), тіньовий загасання (SF - Shadow Fading) і втрати через перешкоди (CL - Clutter Loss) і подаються як:

$$PL_b(d, f_c, \beta) = FSPL(d, f_c) + SF + CL(\alpha, f_c), \quad (3.8)$$

Втрати у вільному просторі залежать від несучої частоти f_c в ГГц і відстані d (тобто похилій дальності) між наземного і супутникового станціями і задаються виразом:

$$FSPL(d, f_c) = 32.45 + 20\log_{10}(f_c) + 20\log_{10}(d), \quad (3.9)$$

В (4.9) d виражається в метрах як функція радіуса Землі R_E , висоти орбіти супутника h і кутового піднесення супутника β , тобто:

$$d = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \beta + h^2} + 2hR_E - R_E \sin \beta, \quad (3.10)$$

SF моделюється як логнормальна випадкова величина, яка виражається в децибелах і має нормальний розподіл з нульовим середнім і стандартними відхиленнями σ_{SF} . CL моделює загасання потужності сигналу, викликане існуючими будівлями та об'єктами на землі. Це залежить від кута піднесення β , частоти несівної f_c та параметрів навколишнього середовища. Значення σ_{SF} и CL вибрані в 3GPP для різних еталонних сценаріїв в залежності від β та f_c . Для сценарію щільної міської забудови та з урахуванням роботи в діапазонах Ka, σ_{SF} коливається від 12.3 до 17.1 дБ в NLOS (от 0.6 до 2.9 дБ в LOS) при значеннях α , що зменшуються, в той же час CL знаходиться в діапазоні від 32.9 до 44.3 дБ в NLOS (в LOS, CL дуже малий і може бути вважатися 0 дБ).

3.5 Атмосферне поглинання

Загасання через атмосферних газів описується як функція несучої частоти f_c , кута піднесення β , висоти орбіти супутника h і щільності водяної пари (тобто абсолютної вологості). На частотах нижче 10 ГГц їм зазвичай можна знехтувати. Однак при $\beta > 10^\circ$ рекомендується виконувати розрахунок для будь-якої частоти вище 1 ГГц. Зокрема, параметр PL_g розраховується як:

$$PL_g(\beta, f_c) = \frac{A_{\text{зенит}}(f_c)}{\sin \beta}, \quad (3.11)$$

$A_{\text{зенит}}(f_c)$ є зенітне загасання (тобто загасання в точці безпосередньо над спостерігачем на Землі), і обумовлено сухим повітрям (киснем, індукованим тиском азотом і нерезонансна дебаєвського загасання) і водяною парою. У нормальних атмосферних умовах $A_{\text{зенит}}(f_c)$ нижче 10 дБ.

У звичайних умовах на середніх широтах (від $\pm 20^\circ$ до $\pm 60^\circ$), сильні рівні мерехтіння спостерігаються рідко, і ми можемо прийняти, що $PL_s = 0$. Для всіх інших широт ми маємо:

$$PL_s(f_c) = \frac{27.5 \cdot S_4^{1.26} \cdot (f_c / 4)^{-1.5}}{\sqrt{2}}, \quad (3.12)$$

S_4 - індекс мерехтіннь амплітуди і залежить від широти. На низьких широтах (між $\pm 20^\circ$, тобто в екваторіальних областях) мерехтіння виникає через великі обсягів збідненої іонізації, створюваної конвективними плазмовими процесами, тому $S_4 = 0.4$. На високих широтах (вище $\pm 60^\circ$, тобто в авроральної і полярної областях) мерехтіння в основному походить від краю зовнішнього пояса Ван-Аллена, тому $S_4 = 0.7$.

Тропосферні мерехтіння: для поширення сигналу в діапазоні частот вище 6 ГГц 3GPP характеризує завмирання через $PL(f_c; \beta)$ як рівень тропосферного загасання в 99% часу і виводиться з як функція від β і f_c . Зокрема, вплив

тропосферних мерехтінь, 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. Тропосферне мерехтіння також збільшується при малих кутах піднесення через більш довгого шляху сигналу.

Пропускна здатність в кілька Гбіт/с в діапазонах міліметрових хвиль може реалізуватися, якщо супутникова станція використовує направлені антени з дуже високим коефіцієнтом посилення, наприклад, $G_{rx} > 50$ дБ, тим самим формуючи дуже гострі промені, що може бути легко досягнуто за допомогою антенних технологій, реалізованих в даний час. Перехід від висоти супутників LEO до супутників GEO, в свою чергу, вимагатиме збільшення підсилення не менше ніж на 30 дБ для підтримки досить великої пропускну здатності. Це практично може бути здійснено, оскільки супутники GEO працюють для послуг фіксованого зв'язку і постійно видно з наземних терміналів, що полегшує установку, обслуговування та експлуатацію спрямованих антен. Крім того, фізичний розмір антен на міліметрових хвилях настільки малий, що стає можливим побудувати дуже великі антенні решітки в обмеженому просторі, тим самим збільшуючи продуктивність за рахунок масивного формування діаграми спрямованості. Нарешті, зверніть увагу, що було б несправедливо безпосередньо порівнювати характеристики наземного і супутникового архітектур через різних характеристик двох сценаріїв (наприклад, одна супутникова станція займає велику площу, ніж типова наземна мала стільника, і, отже, може знадобитися для обслуговування більшої кількості наземних терміналів). З іншого боку, щоб підтвердити можливість прийняття супутникових рішень як засіб для пропозиції додаткового високопродуктивного і відмовостійкого каналу для перевантажених наземних станцій і/або наземних терміналів в віддалених/необслуговуваних районах (які в іншому випадку були б нульовими за пропускну спроможністю).

Проаналізуємо вплив висоти розташування супутника. Пропускна здатність C значно зменшується зі зменшенням значень. Амплітуда тропосферних мерехтінь стає значнішою при малих кутах місця через ефектів багатопроменевого поширення, що призводять до загасання сигналу більше 10 дБ, особливо уздовж прибережних і надводних ліній зв'язку.

Крім того, дуже низька висота призводить до того, що сигнал Земля-супутник проходить через атмосферу довше, що призводить до більшого загасання через атмосферних газів (проте нижче 10 ГГц таким ефектом зазвичай можна знехтувати, як показано на рис. 3, який показує порівняні значення C в залежності від). По-друге, існує чітка кореляція між піднесенням супутника і його ймовірністю перебувати в зоні прямої видимості, тобто супутник в зеніті ($\beta=90$) за визначенням знаходиться в зоні прямої видимості.

LOS, в той час як при зменшенні супутник з більшою ймовірністю буде заблокований висотними будівлями і / або іншими перешкодами. За умови LOS мінімізуються ефекти тропосферного розсіювання, вільного простору і дифракції, що призводить до кращому поширенню, що в цілому забезпечує підвищену пропускну здатність. Більш того, втратами через перешкоди в LOS зазвичай можна знехтувати, тим самим покращуючи якість зв'язку.

Ефекти поглинання через дифракції та перешкод від будівель особливо важливі в щільній міській середовищі. Зокрема, набагато більш висока ймовірність блокування перехрестя в міському сценарії може знизити досяжну пропускну здатність більш ніж на 60% на великій висоті.

До таких висновків можна прийти, глянувши на результати на рис. 4.3, на якому показана пропускна здатність Шеннона C як функція h і від сценарію поширення радіохвиль з урахуванням різних архітектур антен.

Якщо, налаштовані дуже спрямовані антени на супутниках LEO і GEO ($G_{rx}=50$ дБ і $G_{rx}=80$ дБ, відповідно), робота супутників mmWave як і раніше

призводить до пропускної спроможності в декілька Гбіт/с, незважаючи на дуже велику відстань, яку необхідно покрити.

В цілому, бажано використовувати супутники GEO в спектрі нижче 70 ГГц, щоб зменшити втрати атмосферного поглинання і покрити дуже великі відстані передачі, в той час як супутники LEO, які здійснюють зв'язок на набагато меншій висоті, могли б ефективно використовувати більш широку доступну смугу пропускання на високих частотах з обмеженими втратами і невеликими антенами. Однак слід зазначити, що супутники LEO не є стаціонарними по відношенню до поверхні Землі і тому не можуть забезпечувати безперервне покриття: таким чином, необхідна угруповання для підтримки повсюдної безперервності обслуговування.

Конструктивні характеристики супутникових угруповань будуть впливати на продуктивність мережі. Згідно рівнянням геометрії супутника, для одного і того ж сузір'я велика висота призведе до більшої затримки передачі як на GSL, так і на ISL. Зменшення висоти сузір'я призведе до недостатнього мережевого покриття на Землі. За результатами моделювання можна помітити, що більш висока висота сузір'я впливає на продуктивність мережі для TCP-трафіку. У міру збільшення довжини GSL можливість пакетних втрат збільшується. Оскільки TCP гарантує доставку пакетів, кожен втрачений пакет буде бути повторно переданим, що збільшує середню затримку передачі (пакет може бути відправлений кілька разів поки успішно не досягне пункту призначення), зменшується середнє значення по всьому (генерується менше трафіку через збільшення трафіку ретрансляції) і знижує коефіцієнт доставки пакетів (трафік заважає процесу повторної передачі, і з часом втрачається більше пакетів). Тому при проектуванні супутникової мережі для TCP-трафіку краще використовувати меншу висоту.

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

В табл.3.1 показано для порівняння показники LEO, GEO і волоконно оптичних систем для глобального покриття. Зроблено висновок, що, наступне покоління LEO супутникових зможе надавати високоякісні інтернет-послуги в регіонах, не охоплених оптоволоконним з'єднанням. Однак, супутникові мережі не повинні конкурувати з наземними мережами, вони повинні взаємодіяти, щоб надати доступ в Інтернет в глобальному масштабі і максимальною пропускнуою здатністю.

Таблиця 3.1

Порівняння продуктивності супутникових, наземних та волоконно-оптичних систем

Порівняння продуктивності	Оптоволокно	LTE	Стільниковий зв'язок в ММД	Традиційний GEO/MEO супутниковий зв'язок	LEO HTS супутниковий зв'язок (StarLink)	FSO
Ємність	Необмежено	До 3 Гбіт/с	Теоретично до 100 Гбіт/с	50-100 Мбіт/с (GEO) 100-800 Мбіт/с (MEO)	1-5 Гбіт/с	До 30 Гбіт/с
Затримка передачі даних	Наднизька затрима	До 3 мс	До 0,01 мс	Висока затримка 400 мс (GEO) 135 мс (MEO)	Близько 60 мс	0,005 мс
Вимоги	Доступ до місцевої інфраструктури (над або під землею)	Обмежений спектр(смуги пропускання частот від 1,4 МГц до 20 МГц)	Спектр 1-100 ГГц	Ліцензія на земні станції	Ліцензія на земні станції	Довжина хвилі 1550 нм
Чинники вартості	Змінна вартість за кілометр Тривалий час розгортання	Теоретична межа в 1 Гбіт/сек - від 3,2 км (2600 МГц) до 19,7 км (450 МГц). Фіксована вартість за канал + повторювач	Обмеження розмірів стільників(100-150 м). Межи зовнішнього та внутрішнього(в будівлі) використання	Фіксована вартість – швидке розгортання Висока змінна вартість за Мбіт/с Незалежність від відстані	Фіксована вартість – дуже швидке розгортання Низька змінна вартість за Мбіт/с Незалежність від відстані	Висока захищеність каналу Швидке розгортання
Місцевість	Збільшує вартість прокладання за межами міської забудови	Впливає на кількість необхідних повторювачів. Збільшує вартість обслуговування	Поширюється в межах прямої видимості	Не впливає	Не впливає	Не впливає
Реконфігурованість	Обмежена	Обмежена	Обмежена	Обмежена	Швидка реконфігурованість	Швидка реконфігурованість, в т.ч. у випадку стихійного лиха
Довжина лінії зв'язку, км	Міжконтинентальний зв'язок	До 100 км	Для міського сценарію від декількох метрів до 150 м	8046	Теоретично не обмежена	До 15 км для наземних ліній

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі досліджено технологічні особливості інтеграції волоконно-ефірних мереж, де використовується спектр радіохвиль ММД та оптичний діапазон. Зроблено наступні висновки:

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

2) Гетерогенні технології, в тому числі з використанням ММД та оптичного спектру, можуть забезпечити ефективне просторово-рознесене повторне використання радіоресурсів та спектральне мультиплексування із використанням форматів модуляції високого порядку.

3) Фотонні (оптоелектронні) методи генерації, модуляції та передачі радіосигналів ММД є ключем до практичної реалізації волоконно-ефірних інтегрованих систем і мереж телекомунікації.

4) Оптоелектронні методи формування радіосигналів ММД у порівнянні з електронними вважаються більш ефективними і економічно обґрунтованими для практичної реалізації у волоконно-ефірних інтегрованих системах і мережах телекомунікацій.

3) За допомогою інтеграції волоконно-ефірних технологій можливо також реалізувати мультиплексування в ММД за поділом по поляризації, що ще більше може підвищити ефективність використання МІМО технології.

5) Одним із перспективних рішень інтеграції космосу та наземних мереж є архітектура терабітно-оптичної мережі - "Fibre in the Sky" (укр.волокно в небі).

6) Нові концепції мереж з акцентом на інтеграцію із наземними мережами та космічними сегментами в оптичному діапазоні можуть надати надзвичайно гнучку та швидкісну телекомунікаційну систему.

Впровадження гібридних волоконно-ефірних технологій, в яких поєднується провідна волоконно-оптична мережа передачі з радіоканалам, є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності та мобільності мереж доступу, а також може знизити вартість мереж доступу. Тому прогнозується, що розвиток мереж мобільного зв'язку 5G та майбутньої технології 6G будуть засновані на цій технології.


ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. 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
- 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 CO₂ 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



Слайд 1

Тема магістерської роботи:

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ВОЛОКОННО-ЕФІРНИХ МЕРЕЖ ІЗ СУМІСНИМ ВИКОРИСТАННЯМ РАДІО- ТА ОПТИЧНОГО СПЕКТРУ СИГНАЛІВ

виконав:
студент Топчій В.М.
керівник :
Кременецька Я.А. д.т.н.

2022

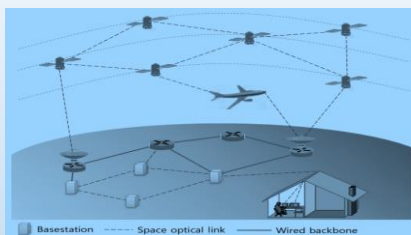
Слайд 2

Актуальність теми магістерської роботи

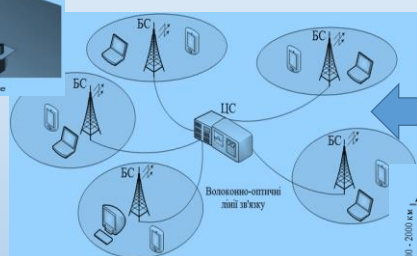
- Технологія волоконно-оптичної передачі може забезпечити величезну смугу пропускання для користувачів широкосмугового Інтернету. Однак, через обмеження практичної реалізації оптичного волокна та кабелю, знижується зручність використання та універсальність продукції. Впровадження гібридних волоконно-ефірних технологій, в яких поєднується провідну волоконно-оптичну мережу передачі з радіоканалам, є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності та мобільності мереж доступу, а також може знизити вартість мереж доступу. Сучасні передові технології мобільного зв'язку 5G та майбутні технології 6G, як прогнозується, будуть засновані на цій технології.
- Тому актуальною задачею є аналіз технологічних особливостей інтеграції волоконно-ефірних мереж, де використовується спектр радіохвиль та оптичний діапазон. Дослідити методи та сценарії гібридних волоконно-ефірних технологій, зробити порівняльний аналіз за продуктивністю супутникових, наземних та волоконно-оптичних систем.

- *Об'єкт дослідження* – перспективи об'єднання оптичних та радіотехнологій.
- *Предмет дослідження* – аналіз методів інтегрування радіо та оптичних мереж з високою пропускнуою здатністю.
- *Мета роботи* – аналіз методів волоконно-ефірної інтеграції, порівняння за пропускнуою здатністю інтегрованих рішень в міліметровому та оптичному діапазонах.
- *Методи дослідження* – на основі теоретичного дослідження, порівняльного аналізу характеристик супутникових, наземних систем, оптичних систем зв'язку.

ПЕРСПЕКТИВНІ СЦЕНАРІЇ ІНТЕГРОВАНИХ ВОЛОКОННО-ЕФІРНИХ МЕРЕЖ

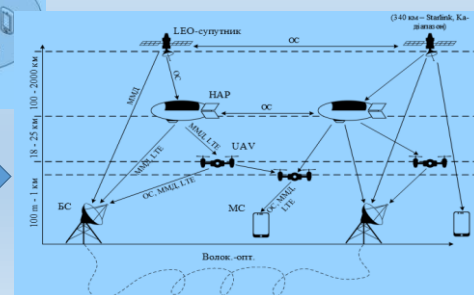


← Концептуальна топологія інтегрованого оптичного зв'язку: супутникові, наземні та домашні мережі



← Гібридна волоконно-ефірна конфігурація мережі: базові станції стільників, що працюють в радіодіапазоні зв'язані через волоконно-оптичні лінії

→ Архітектура багаторівневої космічної мережі з використанням оптичного та радіо- спектру для зв'язку з наземними мережами

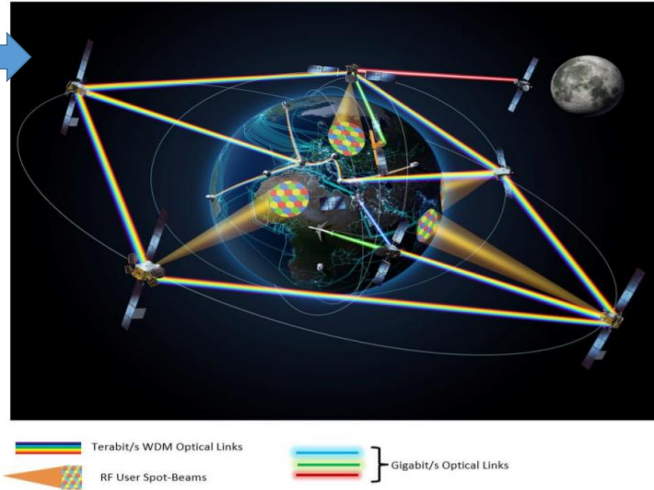


Концепція проекту HydRON для повної оптичної космічної мережі, інтегрованої в інфраструктуру наземної мережі

Слайд 5

Проект HydRON

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



Слайд 6

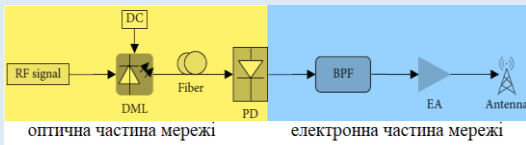
Концепція Проект HydRON

має на меті продемонструвати, що:

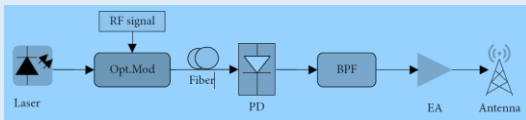
- Повністю оптичні супутникові вузли (GEO/NON-GEO) можуть виробляти надзвичайно високу пропускну здатність даних до терабіт в секунду на канал зв'язку та забезпечують оптичну перемаршрутизацію/перемикання потоків даних, можуть виконувати аналогічні стандартні концепції волокна, які зазвичай застосовуються в наземних системах.
- Вплив атмосферних умов можна зменшити, використовуючи можливості мережі HydRON для перерозподілу даних на орбіті, а отже, спеціальні оптичні станції висхідного/східного зв'язку HydRON Terabit:о може розташовуватися в географічних районах з високою доступністю зв'язку (гарні погодні умови) або о може розташовуватися поблизу точок доступу до наземної мережі та може обслуговувати більше одного супутника паралельно та уникати дорогого часу очікування.
- Внутрішні можливості розповсюдження даних HydRON також дозволять збирати та розповсюджувати дані користувача в архітектурі мережі, подібно до наземної оптоволоконної мережі.
- Нові концепції мережі з акцентом на космічному сегменті та його конкретних операційних обмеженнях (наприклад, маневри утримання станції, передача оптичної наземної станції через погодні умови), водночас, спрямоване на високу інтеграцію із наземним мережами, що виграє від процесів штучного інтелекту для оптимізації та забезпечення надзвичайно гнучкої та інтегрованої мережі.

Структурні схеми генерації радіосигналу оптоелектронними методами

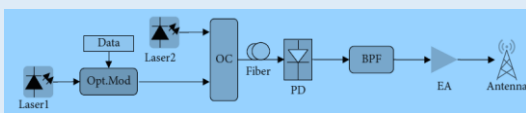
Слайд 7



Структурна схема прямої генерації радіосигналу оптоелектронним методом



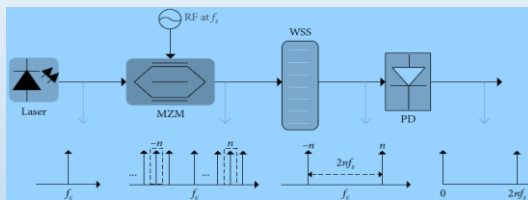
Структурна схема формування радіосигналу методом зовнішньої модуляції



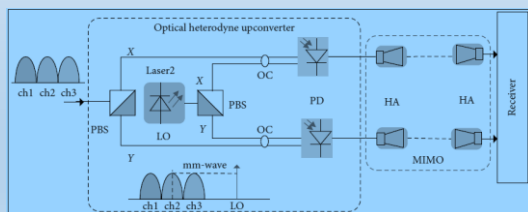
Структурна схема формування радіочастот за допомогою гетеродинного биття оптичних хвиль

Генерація радіосигналів в багаточастотному режимі з поляризаційним розділенням

Слайд 8



Принципова схема багаточастотного режиму генерації радіосигналу до високочастотної області міліметрового діапазону



Принципова схема комбінації модуляції з багатьма несучими для волоконно-сфірної мережі передачі у поєднанні з MIMO та поляризаційним розділенням каналів

Математичне об'ясування генерації багаточастотного векторного радіосигналу

Потужність лазера може бути виражена таким чином:

$$E_{in} = E_0 \cos(\omega_0 t), \quad (1)$$

де E_0 і ω_0 відповідно являють собою амплітуду та кутову частоту оптичного сигналу. І MZM-а, і MZM-б встановлені у точці максимального зсуву. Електричні векторні сигнали, що проходять через MZM-а та MZM-б, дорівнюють $V_a = V_m \cos[\omega_{RF}t + \theta(t)]$ і $V_b = V_m \cos[\omega_{RF}t + \theta(t) + (\pi/2)]$, відповідно. V_m являє собою амплітуду векторного електричного сигналу, а $\theta(t)$ являє собою фазу, ω_{RF} є центральною частотою ВЧ-сигналу збудження. Після того, як вихідний сигнал MZM-б зміщується на 180° по фазі, оптичний сигнал, що генерується разом з MZM-а, може бути виражений як

$$E_{out} = -E_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_{4n-2}[m(t)] (\cos\{\omega_0 - (4n-2)\omega_{RF}\}t - 2\theta(t)\} + \cos\{\omega_0 + (4n-2)\omega_{RF}\}t + 2\theta(t)\}) \quad (2)$$

де $m(t)$ означає індекс модуляції.

В межах ефективного діапазону, ігноруючи оптичну бічну смугу вищого порядку, більшу за J_2 , рівняння (2) можна спростити як

$$E_{out} = -E_0 J_2[m(t)] \{\cos[(\omega_0 + 2\omega_{RF})t + 2\theta(t)] + J_2[m(t)] \cos[(\omega_0 + 2\omega_{RF})t - 2\theta(t)]\} \quad (3)$$

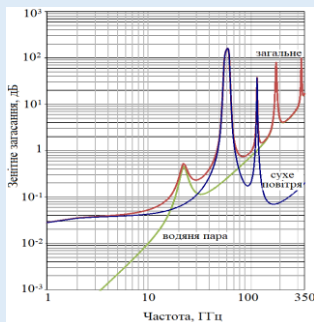
Електричний сигнал, що генерується після перетворення в фотодетекторі, можна виразити як

$$i_{4\omega_{RF}t} = \frac{1}{2} R J_2^2[m(t)] \cos[4\omega_{RF}t + 4\theta(t)] \quad (4)$$

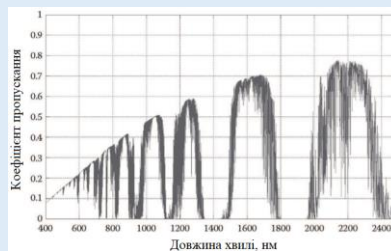
Переваги волоконно-ефірних мереж із сумісним використанням радіо- та оптичного спектру сигналів

- 1) Фотонні (оптоелектронні) методи генерації, модуляції та передачі радіосигналів є ключем до практичної реалізації волоконно-ефірних інтегрованих систем і мереж телекомунікації.
- 2) Оптоелектронні методи формування радіосигналів у порівнянні з електронними вважаються більш ефективними і економічно обґрунтованими для практичної реалізації у волоконно-ефірних інтегрованих системах і мережах телекомунікацій.
- 3) За допомогою інтеграції волоконно-ефірних технологій можливо реалізувати мультиплексування за поділом по поляризації, що ще більше може підвищити ефективність використання MIMO технології.

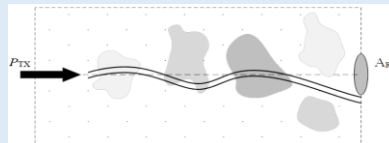
Особливості застосування оптичного та радіочастотного спектру в інтегрованих відкритих мережах



Загальна зенітна заганяння в сухому повітрі і водянній парі (тиск = 1013,25 гПа; температура = 15 °С; щільність водяної пари = 7,5 г/м³)



Коефіцієнт пропускання атмосфери в залежності від довжини оптичної хвилі



Лінія FSO з турбулентними елементами

Системи зв'язку FSO (Free-Space Optics) складаються з різних типів оптичних ліній, включаючи міжсупутникові, супутниково-атмосферні та супутниково-земні станції. Загалом, втрати в оптичному відкритому каналі можна представити як:

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

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

Завади FSO – це пил, туман, дощ, сніг, турбулентність. При цьому ефект ослаблення під час дощу менш значний, 45 дБ/км. Заганяння через сніг також може досягати 150 дБ/км

$$SNR(dB) = 10 \log \left[\frac{1}{0.31 C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{L}{L_0}} \right],$$

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

ПОРІВНЯННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СУПУТНИКОВИХ, НАЗЕМНИХ ТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Порівняння продуктивності	Оптоволокну	LTE	Стільниковий зв'язок в ММД	Традиційний GEO/MEO-супутниковий зв'язок	LEO-NTS-супутниковий зв'язок (StarLink)	FSO
Ємність	Необмежено	До 3 Гбіт/с	Теоретично до 100 Гбіт/с	50-100 Мбіт/с (GEO) 100-800 Мбіт/с (MEO)	1-5 Гбіт/с	До 30 Гбіт/с
Затримка передавачів	Наднизька затримка	До 3 мс	До 0,01 мс	Висока затримка 400 мс (GEO) 135 мс (MEO)	Близько 60 мс	0,005 мс
Вимоги	Доступ до місцевої інфраструктури (над або під землею)	Обмежений спектр (смути пропускання частот від 1,4 МГц до 20 МГц)	Спектр 1-100 ГГц	Ліцензії на земні станції	Ліцензії на земні станції	Довжина хвилі 1550 нм
Чинники вартості	Змінна вартість за кілометр Тривалий час розгортання	Теоретична межа в 1 Гбіт/сек - від 3,2 км (2600 МГц) до 19,7 км (450 МГц) Фіксована вартість за канал + повторювач	Обмеження розмірів стільників (100-150 м). Межі зовнішнього та внутрішнього (вбудовані) використання	Фіксована вартість – швидке розгортання Висока змінна вартість за Мбіт/с Незалежність від відстані	Фіксована вартість – дуже швидке розгортання Низька змінна вартість за Мбіт/с Незалежність від відстані	Висока захищеність каналу Швидке розгортання
Місцевість	Збільшує вартість прокладання за межами міської забудови	Впливає на кількість необхідних повторювачів Збільшує вартість обслуговування	Поширюється в межах прямої видимості	Не впливає	Не впливає	Не впливає
Реконфігурованість	Обмежена	Обмежена	Обмежена	Обмежена	Швидка реконфігурованість	Швидка реконфігурованість, в т.ч. у випадку стихійного лиха
Довжина зв'язку, км	Міжконтинентальний зв'язок	До 100 км	Для міського сценарію від декількох метрів до 150 м	8046 км	Теоретично не обмежена	До 15 км для наземних ліній

Висновки

В магістерській роботі досліджено технологічні особливості інтеграції волоконно-ефірних мереж, де використовується спектр радіохвиль та оптичний діапазон.

- За допомогою інтеграції волоконно-ефірних технологій можливо також реалізувати мультиплексування за поділом по поляризації, що ще більше може підвищити ефективність використання MIMO технології.
- Нові концепції мереж з акцентом на інтеграцію із наземними мережами та космічними сегментами в оптичному діапазоні можуть надати надзвичайно гнучку та швидкісну телекомунікаційну систему.
- Впровадження гібридних волоконно-ефірних технологій, в яких поєднується провідна волоконно-оптична мережа передачі з радіоканалами, є потенційним рішенням для збільшення пропускну здатності та мобільності мереж доступу, а також може знизити вартість мереж доступу. Тому прогнозується, що розвиток мереж мобільного зв'язку 5G та майбутньої технології 6G будуть засновані на цій технології.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи

Стаття:

1. Топчій В.М., Сивик О.С., Шеховцов В.С. Аналіз та вдосконалення сценаріїв розгортання ntn мереж // Наукові записки Державного університету телекомунікацій. – 2021. – №2.

Теза:

2. Топчій В.М., Шеховцов В.С., Кременецька Я.А. Застосування радіо- та оптичного спектру в мережах зв'язку наступних поколінь // XIII Науково-технічна конференція студентів та молодих вчених «Сучасні інфокомунікаційні технології». Державний університет телекомунікацій. – 2021. – 10 грудня.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ !

УДК 621.398.96

Сивик О.С., магістр

Топчій В.М., магістр

Шеховцов В.С., магістр

Державний університет телекомунікацій, Київ

АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СЦЕНАРІЇВ РОЗГОРТАННЯ NTN МЕРЕЖ

Анотація: Епоха технології п'ятого покоління (5G) тільки почалася, і її обіцянки суттєво покращити продуктивність системи стали реальністю. Неназемні мережа (NTN) з підтримкою 5G можливо стануть ефективним рішенням для надання послуг у будь-який час, у будь-якому місці та збільшить зону покриття. У цьому контексті в роботі аналізуються рішення для супутникових систем з високою пропускну здатністю та вдосконаленою технологією багатопроменевої передачі, завдяки їхній здатності збільшувати пропускну здатність системи за рахунок повторного використання частот, збільшення швидкості передачі даних користувачем та спектральної ефективності системи. Адаптація 5G для підтримки неназемних мереж спричиняє цілісний дизайн, що охоплює безліч областей, від мережі радіодоступу до послуг та системних аспектів. У статті аналізуються основні теми неназемних мереж, докладно аналізуються аспекти проектування, проблеми реалізації та напрями наступних досліджень.

Ключові слова: 5G, неназемні мережі, non-terrestrial network, системи висотних платформ, HAPS, архітектура мереж, супутниковий доступ

ВСТУП

Технології NTN (англ. non-terrestrial network) стає загальним терміном для будь-якої мережі, яка включає літаючі неназемні об'єкти. Сімейство NTN включає мережі супутникового зв'язку, системи висотних платформ (HAPS) та мережі "повітря-земля", як показано на рис.1.

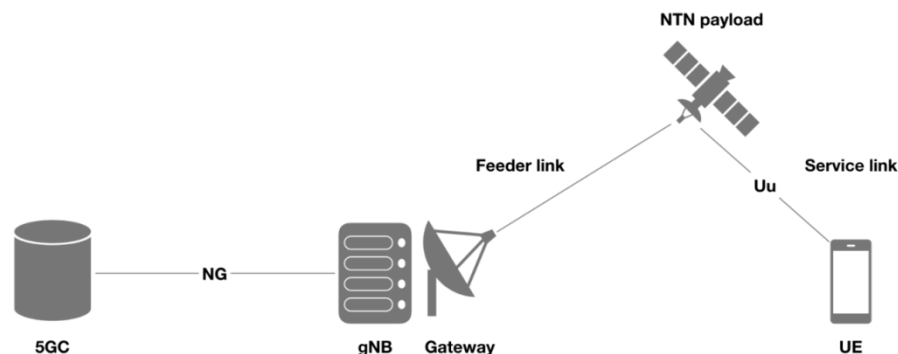


Рис. 1. Архітектура NTN із прозорим корисним навантаженням.

У мережах супутникового зв'язку використовуються космічні платформи, які включають супутники на низькій навколоземній орбіті (LEO), супутники на середній навколоземній орбіті (MEO) та супутники на геостационарній навколоземній орбіті (GEO). За останні кілька років світ став свідком відродження інтересу до широкопasmового зв'язку, що надається мережами LEO NTN із великими супутниковими угрупованнями (наприклад, Starlink, Kuiper та OneWeb). Щоб отримати вигоду від масштабу системи 5G [1] супутникова індустрія підключилася до процесу 3GPP для інтеграції супутникових мереж в систему 5G NR (нова технологія стільникового зв'язку). HAPS - це повітряні платформи, які можуть включати літаки, повітряні кулі і дирижаблі. У технології NTN основна увага приділяється станціям із висотною платформою, таким як базові станції міжнародного мобільного зв'язку, відомі як HIBS (англ. high-altitude platform stations as IMT base stations). Система HIBS надає послуги мобільного зв'язку в тих же смугах частот, що і наземні мобільні мережі.

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

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

NTN на основі 5G New Radio (NR) була основним напрямком [2]. NR був розроблений для прямої сумісності, підтримки низької затримки, передових антенних технологій та гнучкості спектру, включаючи роботу в діапазонах низьких, середніх та високих частот. Це забезпечує міцну основу адаптації NR для підтримки NTN.

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

У роботі [4] обговорюються проблеми та можливості NTN, а також представлений практичний приклад використання частот міліметрового

діапазону для підключення мобільних терміналів. Детальний огляд NTN представлений у [5], але обговорення роботи 3GPP NTN у ньому залишається високому рівні. Натомість, мета цієї статті – проаналізувати варіанти роботи NTN, заглибившись у детальні аспекти та фундаментальні обґрунтування застосування технологій, що впливають на стандартизацію. Зокрема, у цьому документі обговорюються ключові рішення NTN, що охоплюють безліч областей, від мережі радіодоступу до послуг та системних аспектів до ядра та терміналів.

Мережі радіодоступу для NR NTN

Робота над NR NTN розпочалася у 2017 році з дослідження, присвяченого сценаріям розгортання та моделям каналів [6]. Першою основною метою дослідження було вибрати кілька еталонних сценаріїв розгортання NTN та узгодити ключові параметри, такі як архітектура, висота орбіти, смуги частот тощо.

Ключові сценарії та моделі включають:

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

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

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

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

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

Стек протоколів верхнього рівня NR поділено на площину користувача (UP), яка керує передачею даних, та площину управління (англ. control plane, CP), що відповідає за сигналізацію. Для UP основний вплив мають тривалі затримки поширення в NTN.

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

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

З погляду фізичного рівня, великі оцінки каналного та системного рівнів проводилися у двох номінальних смугах частот: діапазонах S та Ka. З аналізу [6-8] можна зробити висновок, що при відповідних схемах розташування супутникових променів портативне обладнання (UE) може обслуговуватися мережами LEO і GEO в S-діапазоні, а інше UE з високим коефіцієнтом підсилення передавальної та приймальної антен терміналу (VSAT) і UE, можуть обслуговуватися LEO і GEO як в S-, так і в Ka-діапазонах.

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

Мета останніх досліджень [1-8] полягає у визначенні покращень, необхідних для NTN на базі LEO та GEO, а також націлити на неявну підтримку HAPS та мереж "повітря-земля". Це включає аспекти фізичного рівня, протоколи та архітектуру, а також управління радіоресурсами, вимоги до радіочастот та використання смуги частот. Основна увага приділяється

прозорій архітектурі корисного навантаження з фіксованими наземними зонами та системами дуплексного зв'язку із частотним розподілом (FDD), де передбачається, що всі UE мають можливості глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS).

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

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

Як показано в [6-8] передачі в NR засновані на 16 процесах HARQ із зупинкою та очікуванням для безперервних передач. Процес HARQ не може бути повторно використаний для нової передачі, доки не буде отримано зворотний зв'язок для попередньої передачі. При тривалих RTT та використанні протоколу зупинки та очікування передачі зупинятимуться, коли всі процеси HARQ очікують зворотного зв'язку, що знижує пропускну здатність зв'язку. Щоб зменшити зрив, кількість процесів HARQ збільшена до 32, що може охоплювати деякі сценарії "повітря-земля". Однак 32 процесів HARQ недостатньо для покриття RTT NTN на основі LEO та GEO. Оскільки подальше збільшення кількості процесів HARQ вважається небажаним, необхідно використовувати схеми для повторного використання того самого процесу HARQ до того, як пройде повний RTT, щоб уникнути зупинки. При повторному використанні процесу HARQ для передачі по низхідній лінії зв'язку до того, як пройде RTT, зворотний зв'язок HARQ стає непотрібним і таким чином відключається. Для висхідної лінії зв'язку немає зворотного

зв'язку HARQ, і gNB може динамічно вирішувати, чи повторно використовувати процес HARQ до того, як пройде RTT, відправивши гранти для нових даних або гранти для повторних передач, або дочекатися, поки він не декодує передачу по висхідній лінії. Показано, щоб реалізувати в реальному часі RTT NTN для UE необхідно (повторно) вибрати новий супутник, який заснований на існуючих критеріях і може включати нові критерії, такі як час, коли супутник перестає покривати зону, де знаходиться UE. Умовна передача обслуговування заснована на місцезнаходження UE та синхронізації супутникового покриття з місцем розташування UE.

Послуги та системні аспекти NR NTN

У дослідженні, задокументованому в [7], визначено варіанти використання супутників, що використовуються як технології доступу від UE, так і як транзитного каналу між наземною базовою станцією (BS) і мережею між BS (англ. core network, CN). Для супутникового доступу UE варіанти використання включають, наприклад, використання супутника для широкомовної послуги, щоб гарантувати покриття для пристроїв IoT і забезпечити критично важливий доступ у надзвичайних ситуаціях. Для сценаріїв супутникового зворотного зв'язку варіанти використання включають, наприклад, фіксований зворотний зв'язок між BS у віддаленій області і CN, а також зворотний між рухомою BS, розгорнутої в поїзді, і CN.

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

Потенційно широке охоплення супутниковими радіосистемами у багатьох країнах є проблемою, коли справа доходить до виконання

нормативних вимог. Функція управління доступом та мобільністю (англ. access and mobility management function, AMF) може потребувати перевірки того, що UE знаходиться в зоні (країні), яку AMF може обслуговувати, як показано на рис.2. Перевірка може здійснюватися за допомогою RAN.

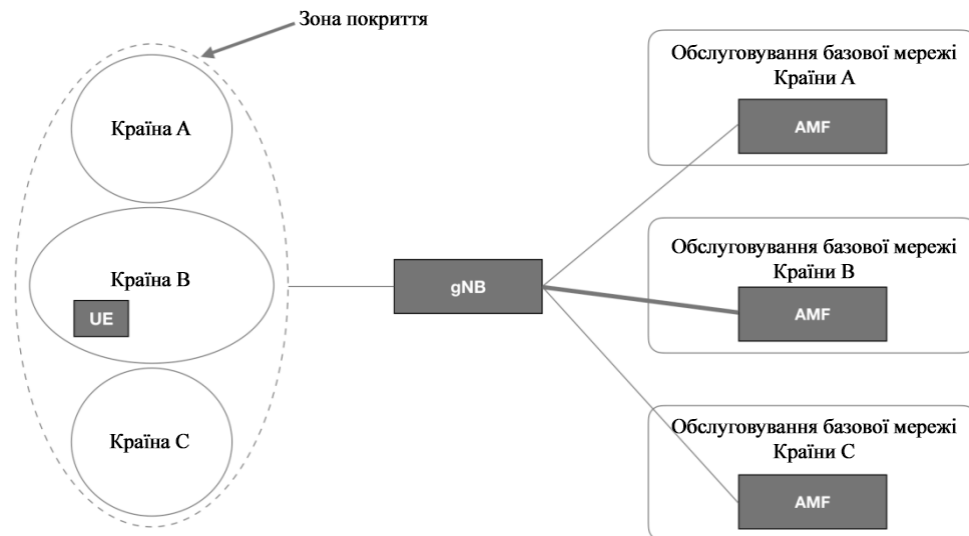


Рис. 2. Супутниковий доступ, що охоплює декілька країн та gNB, підключений до стільникових мереж, що обслуговують різні країни.

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

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

У 2019 році SA5 розпочала дослідження аспектів управління та оркестрування з інтегрованими супутниковими компонентами у мережі 5G [8]. Основна мета – вивчити бізнес-ролі, а також послуги, управління мережею та оркестрування мережі 5G з інтегрованими супутниковими компонентами. Об'єм включає супутниковий доступ на основі NTN RAN, так і супутниковий доступ, не пов'язаний з 3GPP, а також аспекти транзитного з'єднання. Мета

полягає в тому, щоб повторно використовувати існуючу бізнес-модель, управління та оркестрування поточної мережі 5G, щоб мінімізувати вплив.

Результат дослідження задокументований у [8], який включає варіанти використання, а також потенційні вимоги та рішення, наприклад, для управління та моніторингу компонентів gNB та управління мережевим сегментом. Порівняно з наземним NR, впливи в основному відбуваються через сценарії LEO/MEO, де компоненти gNB, такі як gNB-DU, розташовані на борту супутникових апаратів і, таким чином, будуть переміщатися щодо Землі. Інші покращення необхідні через тривалі затримки, які впливають на деякі функції моніторингу та ключові показники ефективності. Для покращення ефективності запропоновано концепції мереж, що самоорганізуються (англ. self organizing network, SON) для 5G необхідно, а також обробка вимірювань робочих характеристик, які використовують процес HARQ, що може бути недоступний при використанні супутникової RAN. Крім того, функції моніторингу, що підтримують використання балансування навантаження між різними радіотехнологіями, повинні бути розширені, щоб охопити балансування навантаження між наземною RAN та не наземною RAN.

ВИСНОВКИ

Безперервна еволюція технології 5G спрямована на підвищення продуктивності та вирішення нових варіантів використання. Властива технології 5G гнучкість забезпечує міцну основу для її адаптації для підтримки неназемних мереж NTN. NTN та, особливо, мережі міжсупутникового зв'язку є складними системами, для проектування яких необхідний цілісний підхід. В проведеному аналізі надано огляд сучасного стану роботи NTN в рамках 3GPP, детально пояснені аспекти проектування. Показано, що реалізація технологій 5G для неназемних мереж є реальністю. Але необхідні не лише стандартизація, а й подальші дослідження аспектів проектування NTN. Будемо сподіватись, що технології 5G відіграватиме важливу роль у забезпеченні зв'язку з космосу в найближчі роки.

Список використаної літератури

1. EMEA Satellite Operators Association, “ESOA satellite action plan for 5G standards,” white paper. [Електронний ресурс] // URL: <https://www.esoa.net/cmsdata/positions/1771%20ESOA%205G%20standards.pdf>
2. X. Lin et al., “5G New Radio evolution meets satellite communications: Opportunities, challenges, and solutions,” in 5G and Beyond: Fundamentals and Standards, X. Lin and N. Lee, Eds. Springer, 2021.
3. RP-193235, “Study on NB-IoT/eMTC support for non-terrestrial network”, 3GPP TSG-RAN Meeting #86, December 2019 [Електронний ресурс] // URL:

- <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3747>
4. M. Giordani and M. Zorzi, "Non-terrestrial communication in the 6G era: Challenges and opportunities," arXiv preprint arXiv:1912.10226, December 2019.
 5. F. Rinaldi et al., "Non-terrestrial networks in 5G & beyond: A survey," IEEE Access, vol. 8, pp. 165178-165200, 2020.
 6. TR 38.811, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks," V15.4.0, October 2020. [Электронный ресурс] // URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3234>
 7. TR 22.822, "Study on using satellite access in 5G," V16.0.0, August 2018. [Электронный ресурс] // URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3372>
 8. TR 28.808, "Study on management and orchestration aspects of integrated satellite components in a 5G network," V1.1.0, January 2021. [Электронный ресурс] // URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3617>

ЗАСТОСУВАННЯ РАДІО- ТА ОПТИЧНОГО СПЕКТРУ В МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ НАСТУПНИХ ПОКОЛІНЬ

Топчій Владислав Миколайович

Шеховцов Владислав Сергійович

Кременецька Яна Адольфівна

Державний університет телекомунікацій

Навчально-науковий інститут телекомунікацій

м. Київ

Анотація – в роботі аналізується напрямки розвитку телекомунікаційних технологій 6G, майбутні сценарії широкосмугового зв'язку із застосуванням терагерцового і оптичного діапазону хвиль. Показано, що дослідження застосування фотонних технологій в космічних і наземних сегментах є важливими напрямками для розвитку FG-NET-2030

Оперативна група ІТУ-Т по визначенню технологій для мереж 2030 (FG NET-2030), з вивчення можливостей мереж на період до 2030 року і далі сформулювала найбільш загальні вимоги до мереж зв'язку шостого покоління (6 G). У відповідності з документами FG NET-2030 очікується, що для 6G з'явиться сервіс голографічного зв'язку, тактильний інтернет, який буде орієнтуватися на відчуття людини, наприклад, запах і смак, а також віртуальні копії фізичних об'єктів. Очікується, що пікова швидкість передачі даних, в порівнянні з 5G, виросте на 50%, до терабіт в секунду. Крім приросту в швидкості, мережі 6G забезпечать затримку на рівні 1 мс. Ключові рішення 6G телекомунікаційних технологій показані на рисунку 1.

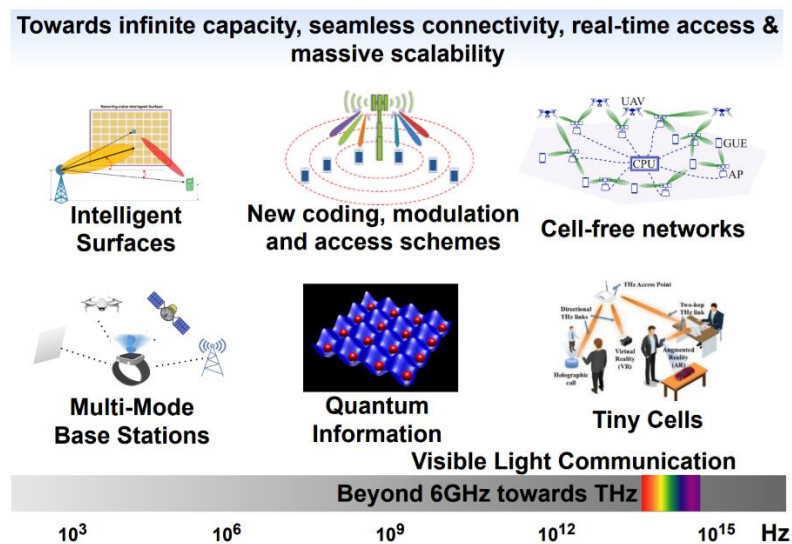


Рисунок 1 – Напрями розвитку комунікаційних технологій 6G

Наприклад, майбутні мережі зв'язку повинні будуть перейти до ще більш малим розмірам осередків для підтримки високочастотних діапазонів в терагерцовому радіодіапазоні (ТГц) та оптичному діапазоні (ОД). Супутникові технології доступу на низькій навколоземній орбіті (LEO), стратосферні платформи (HAP) і безпілотні ретранслятори (UAV), які будуть реалізувати космічний Інтернет, будуть забезпечувати майбутні сценарії широкосмугового зв'язку з допустимою затримкою до 30 мс. Протилежний характер складності надання загальних засобів зв'язку для кінцевого користувача і конвергенція з фіксованими мережами потребують створення інфраструктури, стійкої як до затримок, так і до втрат.

Також, спектральний потенціал ТГц і оптичного діапазонів (ОД) для застосування у вільному просторі має суттєві недоліки, такі як спотворення форми сигналу, внаслідок фазових і амплітудних флуктуацій, завмирання каналу, викликані атмосферною турбулентністю і таке ін. після передачі в атмосферних каналах. Для оптичного променя стан поляризації є найбільш стабільною властивістю в порівнянні з амплітудою і фаза при поширенні по турбулентному каналу. Для систем 6G необхідні ефективні методи кодування, модуляції, мультиплексування для забезпечення високої спектральної і енергетичної ефективності, забезпечення безпеки. Дослідження також показують, що найменший вплив на канали в ТГц і ОД надають імпульсні методи модуляції. Фазовий шум електронних пристроїв обмежує вихідну потужність сигналу. Рішення на основі фотонних методів застосовуються для формування радіосигналів, формування діаграм спрямованості фазованих антенних решіток, а також є фундаментальною основою для розробки квантових комп'ютерів.

Тому фотонні технології, дослідження їх застосування в космічних і наземних сегментах є важливими напрямками для розвитку FG-NET-2030.

Список використаних джерел:

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. 3GPP, *Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN) / TR 38.821 (Release 16), 2020.*
4. Я. А. Кременецкая, Е. Р. Жукова, Н. В. Градобоева, Д. А. Любас, Б. В. Саенко / *Физические аспекты моделирования радиоканала и шумов в миллиметровом диапазоне // Телекоммуникаційні та інформаційні технології. - 2018. - № 2. - С. 60-71.*