

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ТА ОПТИЧНОГО
ДІАПАЗОНІВ В ГІБРИДНИХ КОНФІГУРАЦІЯХ МЕРЕЖ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи РТДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Олійник Н.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Кременецька Я.А.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

Київ - 2022

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Мобільних та відеоінформаційних

Н. В. Руденко

“ ”

2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Олійник Наталії Олександрівні

1. Тема роботи: “Застосування терагерцового та оптичного діапазонів в гібридних конфігураціях мереж”,
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. Вимоги до систем п'ятого покоління 5 G. Рекомендації МСЕ.
2. Розвиток та еволюція телекомунікаційних технологій. Науково-технічна література, міжнародні рекомендації та стандарти.
3. Науково-технічна література.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Тенденційність використання частотного спектру міліметрового діапазону та технологічні впровадження.

2. Архітектура для стільникових мереж 5G з використанням міліметрового діапазону хвиль.

3. Технологічні досягнення для телекомунікацій в терагерцовому та оптичному діапазонах.

4. Розвиток інтегрованих волоконно-ефірних мереж із сумісним використанням радіо- та оптичного спектру сигналів.

5. Графічна частина роботи представлена на 12 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

Олійник Н.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Кременецька Я.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

“ ”

_____ 202_ року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

по магістерській кваліфікаційній роботі

Студента Олійник Наталії Олександрівні

на тему: “ Застосування терагерцового та оптичного діапазонів в гібридних конфігураціях мереж ”

Актуальність:

Магістерська робота присвячена аналізу технологічних особливостей інтеграції волоконно-ефірних мереж, де використовується спектр радіохвиль міліметрового та терагерцового діапазону 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 наземних безпроводових у оптичному діапазоні 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 проаналізовано перспективний стандарт Wi-Fi 802.11ay,
2. В роботі не достатньо проаналізовано критерії обмеження пропускної здатності відкритих каналів в оптичному діапазоні.

Висновки:

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку “**відмінно**”, а студентка Олійник Наталія Олександрівна - присвоєння кваліфікації “ Магістр з телекомунікацій та радіотехніки”.

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

Підпис рецензента

(_____)

Підпис

засвідчую

Підпис особи, що засвідчує

(_____)

М.П.

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

Направляється студентка Олійник Н. О. до захисту магістерської роботи
(прізвище та ініціали)

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

на тему: Застосування терагерцового та оптичного діапазонів в гібридних конфігураціях мереж

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор інституту _____

(підпис)

Кравченко В.І.

(прізвище та ініціали)

Довідка про успішність

Олійник Н. О. 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

Студентка Олійник Наталія Олександрівна 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 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 Олійник Наталія Олександрівна - 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 _____

Олійник Н.О.

(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Державній екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

Мобільних та відеоінформаційних технологій

(підпис)

Руденко Н.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 62 с., 22 рис., 4 табл., 22 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 у високочастотних радіо та оптичному діапазонах.

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

У магістерській роботі показано, що своєння частотних ресурсів терагерцового і оптичного діапазонів є одним із шляхів вирішення проблеми підвищення пропускної здатності телекомунікаційних систем. До терагерцового діапазону електромагнітних хвиль прийнято відносити частоти від 100 ГГц до 1 ТГц. В роботі аналізуються інтегровані волоконно-ефірні технології, в яких поєднується провідна волоконно-оптична мережу передачі з радіоканалами. Проведено порівняння продуктивності наземних та волоконно-оптичних систем. Показано, що поєднання переваг волоконно-оптичних та високочастотних радіотехнологій передачі, є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності та мобільності мереж доступу телекомунікаційних систем.

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

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ТА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНІВ	9
1.1 Згасання ММД і ТГЦв атмосфері та інших середовищах	10
1.2 Ефект Допплера і відбивання ММХ	14
1.3 Стійкість до завад ММД	14
1.4 Порівняння ММД (ТГЦ) з іншими радіодіапазонами	16
1.5 Застосування оптичного та радіочастотного спектру в	20
2 ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ ДЛЯ СИСТЕМ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ	26
2.1 Загальна характеристика і особливості цифрових систем зв'язку стандарту 5G	26
2.2. Аналіз розвитку систем мобільного зв'язку п'ятого покоління	29
2.3 Гібридні системи зв'язку	35
2.4. Аналіз технічних вимог та енергетичних параметрів для реалізації технології 5G	36
2.5 Оптоелектронна обробка радіочастотних сигналів та рішення інтеграції безпроводових та волоконно-оптичних технологій	40
3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОКРИТТЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ НАЗЕМНИХ РАДІО ТА ОПТИЧНИХ СИСТЕМ.	44
3.1 АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ПОШИРЕННЯ СИГНАЛІВ	45
3.2 Оптоелектронні та волоконно-ефірні технології	52
3.3. Гібридні архітектури мереж для зв'язку у міліметровому діапазоні	59
3.4 Порівняння продуктивності супутникових GEO і LEO систем наступного покоління та волоконно-оптичних систем	61
ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	64
ДОДАТОК 1	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БС	Базова станція
БПЛА	Безпілотні літальні апарати
ММД	Міліметрового діапазону
ММХ	Міліметрові хвилі
НВЧ	Надзвичайно високих частот
РЧ	Радіочастотний
ФАР	Фазова антенна решітка
ABS	Майже порожній підкадр (Almost Blank Subframe)
ANDSF	Функція виявлення та вибору мережі доступу (Access Network Discovery and Selection Function)
BBIC	Біоломінісцентна інтегральна схема (Bioluminescent Bioreporter Integrated Circuit)
CEPT	Конференція поштових та телекомунікаційних адміністрацій (Conference of Postal and Telecommunications administrations)
CMOS	Комплементарний метало-оксидний напівпровідник (Complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor)
CPRI	Загальний відкритий радіо інтерфейс (Common Public Radio Interface)
CWDM	Мультиплексування з грубим поділом по довжині хвилі (Coarse Wavelength Division Multiplexing)
CAPWAP	Управління та забезпечення безпроводових точок доступу (Control And Provisioning of Wireless Access Point)
D2D	Пристрій-до-пристрою (Device-to-Device)
FCC	Федеральна комісія зв'язку (Federal Communications Commission)
FSO	Оптичний зв'язок у вільному просторі (Free-Space Optics)
FSPL	Поширення сигналу у вільному просторі (Free Space Propagation)
GEO	Геостаціонарна навколосемна орбіта (Geostationary Orbit)
HAPS	Стратосферна платформа-станція (High-Altitude Platform-Station)
IoT	Інтернет речей (Internet of Things)
ISD	Міжпунктна відстань (Inter-Site Distance)
ITU-R	Сектор радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector)
LEO	Низька навколосемна орбіта (Low Earth Orbit)
LOS	Пряма видимість (Line of Sight)

ВСТУП

В даний період, який характеризується ростом обсягу інформаційних потоків в економічній і соціальній сфері, інформація є вирішальним фактором, що визначає розвиток технології і ресурсів в цілому. Це пов'язано з появою хмарних сервісів, багатофункціональних пристроїв, інших інформаційних технологій, культурним і соціальним розвитком суспільства, удосконаленням освітньої системи.

Стандарти, що виникають, подовжують збільшувати швидкість бездротової передачі. Проте більшість з них працює у мікрохвильовому діапазоні від 2 до 5 ГГц, що теоретично обмежує потенційні ресурси для підвищення пропускної здатності. Згідно емпіричному правилу, приблизно 10% від несучої частоти вважається доступною пропускною здатність радіосистем. Внаслідок цього радіосигнали, нижчі 10 ГГц, ледве досягають швидкості передачі даних за межі 1 Гбіт/с.

Діапазони міліметрових хвиль (ММХ) та терагерцового (ТГц) діапазону є перспективним рішенням для швидкозростаючого попиту на пропускну здатність. Розвиток бездротового зв'язку визначається подальшим ущільненням існуючого частотного діапазону, ресурс якого до 30 ГГц практично вичерпаний.

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 терагерцового діапазону та оптичний діапазон. Дослідити методи та сценарії гібридних волоконно-ефірних технологій, зробити порівняльний аналіз за продуктивністю супутникових, наземних та волоконно-оптичних систем.

1 ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ТА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНІВ

Системи радіозв'язку, що працюють в ММД та ТГц найбільш близькі до теоретичної границі, що виходить з теореми Шеннона:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

де C - швидкість передачі двійкової інформації;

S - середня потужність передавача;

N - потужність шуму в смузі частот W .

Шумоподібні сигнали не впливають на роботу вузькосмугових сигналів і не піддаються федингу, навпаки, через багатопроменеве поширення шумоподібних сигналів виникають канали додаткової хвилевої енергії.

Перспективним рішенням є освоєння більш високих і поки майже вільних частот міліметрового і субміліметрового діапазонів. Нові методи аналізу завадостійкості, математичні часові моделі сигналів складної форми, досягнення в області наноелектроніки визначають формування нових теоретичних положень в області радіоелектроніки та образне моделювання зон покриття широкосмугових систем зв'язку ММД і ТГц. У загальному вигляді основні вимоги до перспективних систем радіозв'язку можна перерахувати:

- забезпечення прихованого зв'язку на фізичному рівні;
- ущільнення діапазонів частот, що використовують, в десятки разів;
- висока завадозахищеність;
- підвищена дальність зв'язку;
- висока швидкість передачі інформації;
- вузька спрямованість антен;
- мініатюризація елементної комплектації.

Ці вимоги призводять до підвищення робочих частот до міліметрового та субміліметрового діапазонів, ускладнення методів кодування та модуляції

радіосигналів, що також призводить до необхідності створення відповідних пристроїв генерування та приймання таких сигналів.

1.1 Згасання ММД і ТГцв атмосфері та інших середовищах

До міліметрового діапазону (ММД) прийнято відносити радіохвилі з частотами від 30 до 300 ГГц, до терагерцового діапазону від 300 до 3000 ГГц.

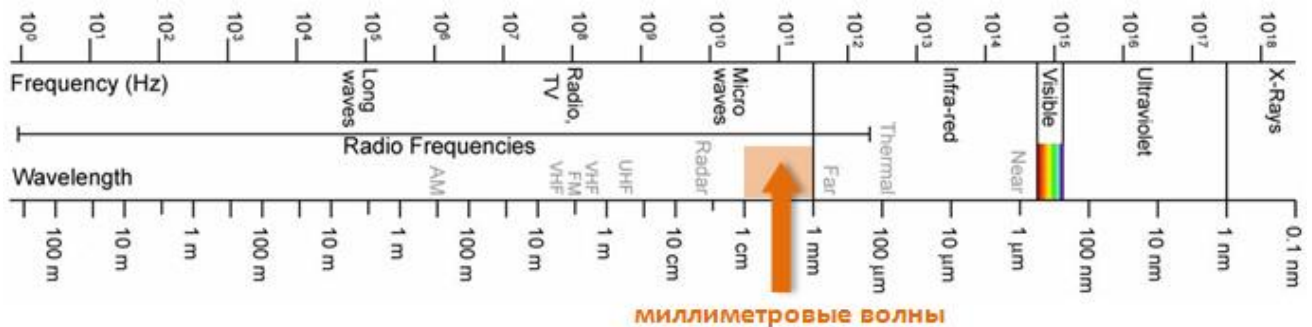


Рис.1.1. Діапазон міліметрових хвиль в шкалі електромагнітних хвиль

Хоча в останній час терагерцевий діапазон стали вважати з 110 ГГц. Тривалий час ММД (СММД) хвилі вважалися непридатними для практичного використання через відсутність досконалих засобів генерації, прийому, каналізації СВЧ коливань, а також через незнання законів їх поширення в земній атмосфері. Створенню систем зв'язку в міліметровому діапазоні хвиль передували численні дослідження особливостей поширення цих хвиль в земній атмосфері, а також розробки нових засобів генерації і прийому СВЧ сигналів на частотах вище 30 ГГц. Припускається, що підвищення пропускну здатності з використанням ММД зросте до 10 Гбіт/с. Тим не менш, поширення ММХ обмежене високими втратами в атмосфері (рис.2), міській забудові, листях дерев, людському тілі та т. ін. (дим, туман, пил практично не впливають на поширення ММХ).

Проте через особливості поширення (випромінювання) сигналів ММД спектральна ефективність зростає з підвищенням густини розподілу базових станцій (густина розміщення випромінюючих елементів фазованих антенних

граток), що контрастує з інтерференційною обмеженістю УВЧ діапазону для стільникового зв'язку. Поки не існує загальноприйнятої моделі енергетичного бюджету, алгоритму роботи таких мереж. Можливою причиною цього може бути поки що недостатнє вивчення фізичних властивостей поширення ММХ та апаратні обмеження, хоча на 2018-2020 роки вже прогнозується застосування міліметрового діапазону в мобільних системах.

Більш важливими в освоєнні ММД спеціалісти в діапазоні у вікнах прозорості атмосфери 75-110 ГГц з можливістю передачі до 10 Гбит/с. Інтенсивність поглинання радіохвиль ММД не настільки велика як в СММД хвиль і зумовлена наявністю молекул кисню і водяної пари на частотах 22,2 (H₂O), 60 (O₂), 118,8 (O₂) і 180 (H₂O) ГГц. В цілому ММХ відносяться до хвиль зі змінною дальністю дії через порівняно велике молекулярне поглинання в парах води і кисню повітря, а також через послаблення в різних гідрометеорах атмосфери [2-6].

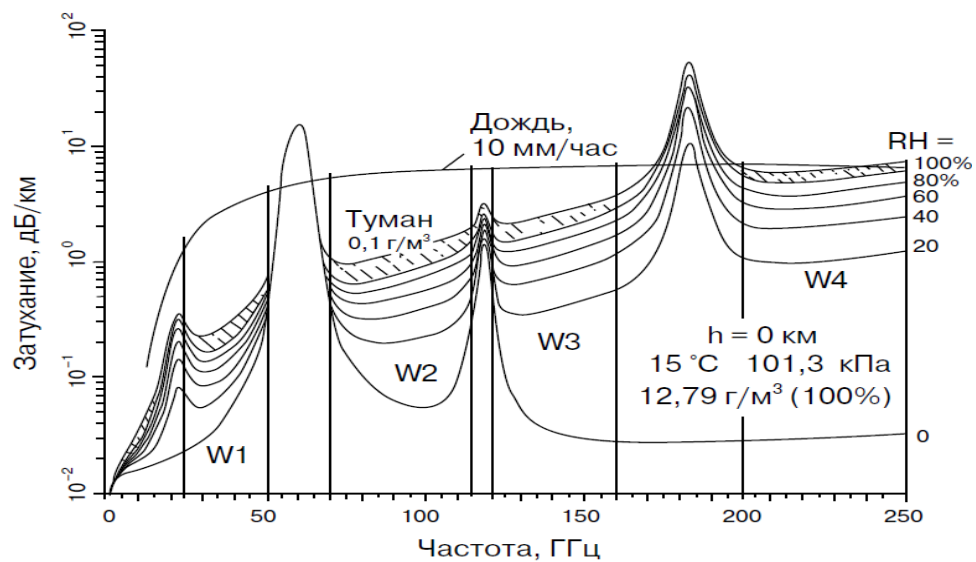


Рис.1.2. Атмосферне згасання на рівні моря для різних рівнів вологості (RH), включи туман та дощ, для міліметрового діапазону хвиль, W1-W4 – вікна прозорості атмосфери.

Хвилі ММД і СММД легко проникають через незначні перешкоди, які є непереборними для світла, - наприклад, фарбу, шар пилу, пластмасу або навіть корпус мікросхеми. У той же час міліметрові хвилі не проходять через

більшість твердих матеріалів (таблиця 2.4). Втрати через відбивання та дифракцію сильно залежать від матеріалів і поверхні.

Таблиця 1.1
Коефіцієнт послаблення для різних матеріалів [7,8]

Матеріал	БСЗ-010-3	Товщина, см		
		< 3 ГГц [6,8]	40 ГГц [7]	60 ГГц [6]
Гіпсокартон	2,5	5,4	-	6,0
Офісна перегородка	1,9	0,5	-	9,6
Чисте скло	0,3/0,4	6,4	2,5	3,6
Склообої	0,3	7,7	-	10,2
ДСП	1,6	-	0,6	-
Дерево	0,7	5,4	3,5	-
Суша штукатурка	1,5	-	2,9	-
Вапняний розчин	10	-	160	-
Кирпична стіна	10	-	178	-
Бетон	10	17,7	175	-

Високий рівень згасання для певних будівельних матеріалів (таких, як цегла і бетон) обмежує пропускання всередину будівель ММХ, які випромінюють вуличні базові станції та інші зовнішні джерела, хоча деякі сигнали можуть потрапити крізь вікна і дерев'яні двері. В цьому випадку всередині приміщень можуть використовуватися інші бездротові технології, такі як міліметрові фемтостільники або Wi-Fi. Відзначимо, що вже розроблено нове покоління технології Wi-Fi, що використовує 60 ГГц діапазон - стандарт IEEE 802.11ad. Значні втрати через поглинання міліметрових хвиль в листі. В роботі [2] наведена емпірична формула розрахунку поглинання в листі. Наприклад, на частоті 80 ГГц і при глибині листяного шару 10 м втрати можуть досягати 23,5 дБ, що на 15 дБ вище, ніж втрати на частоті 3 ГГц (рис. 2.4).

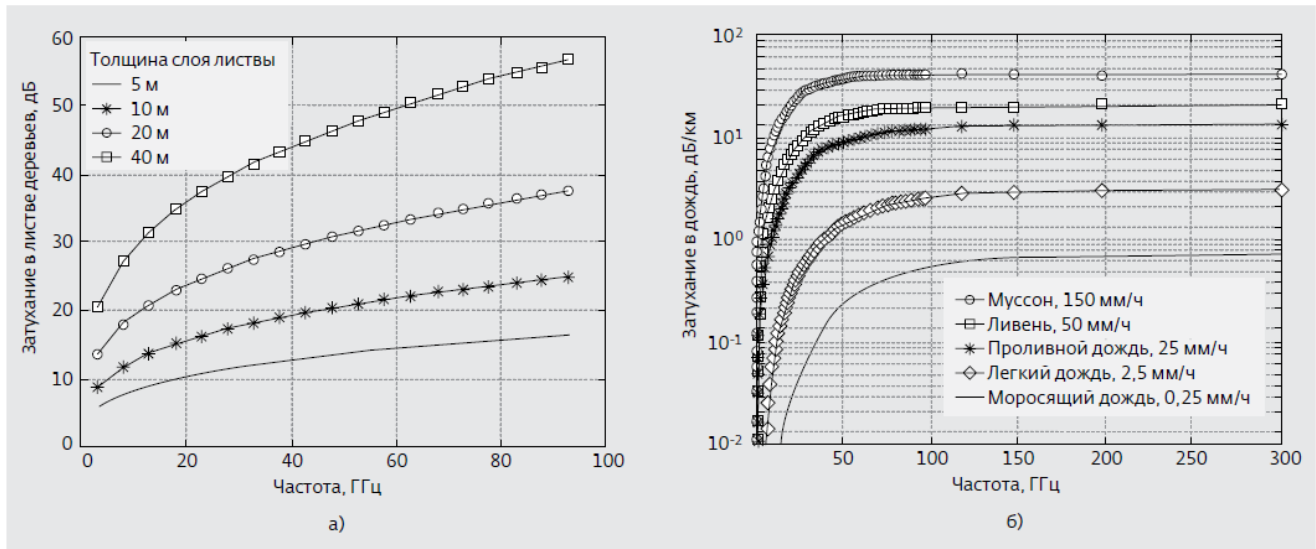


Рисунок 1.4. Поширення міліметрових хвиль: а) втрати у листі; б) згасання при дощі

Послаблення (у дБ/км) можна розрахувати в залежності від інтенсивності дощу (мм/год) [8] (рис. 3.4б). Для втрат в листі $L = 0.2f^{0.3} \cdot R^{0.6}$, де L - втрати поширення, дБ; f - частота, МГц; R - глибина шару листя, м. Формула застосовується для $R < 400$ м. Наприклад, легкий дощ з інтенсивністю 2,5 мм / год дає згасання в 1 дБ / км, тоді як проливний дощ типу мусону з інтенсивністю опадів у 150 мм/ч призводить до небезпечних величин в десятки децибел. Найбільш інтенсивні дощі зазвичай випадають в небагатьох країнах, вони нетривалі і покривають невелику площу. В даний час для більш протяжних ліній зв'язку цікавими є "вікна прозорості" атмосфери на частотах 35, 94, 140 і 220 ГГц, де спостерігається мінімальне згасання в порівнянні з сусідніми ділянками ММХ. На середніх широтах при помірній вологості і температурі повітря в ясну погоду влітку у земної поверхні повне послаблення невелике і при вертикальному поширенні через атмосферу на частоті 94 ГГц не перевищує 1,3 дБ.

1.2 Ефект Доплера і відбивання ММХ

Ефект Доплера в бездротовому каналі залежить від частоти несучої і швидкості руху. Припустимо, що у нас є сильно розріджене середовище та ненапрявлена антена. Тоді максимальне доплерівське зміщення для несучої частоти 3-60 ГГц і швидкості руху приймача 3-350 км/ч буде знаходитися в діапазоні від 10 Гц до 20 кГц. Величина доплерівського зміщення в прийнятій хвилі різна для різних кутів прийому (так званий ефект Доплера розкиду). У разі ММХ вузькоспрямований промінь від передавача до приймача істотно зменшує кутовий розкид вхідних хвиль, що в свою чергу зменшує доплерівський розкид. До того ж, вхідна хвиля сконцентрована в певному напрямі, що дає відмінний від нуля зсув доплерівського спектра, але в більшості випадків компенсується ланцюгом автоматичного підстроювання частоти (АПЧ) у приймачі.

Отже, в сильно розсіюючому середовищі варіації сигналу у часовій області в каналі ММХ істотно нижчі, ніж у випадку всеспрямованої антени.

Для вузькоспрямованого променя відбитий сигнал в міліметровому діапазоні невеликий. Дослідження показали, що середньоквадратичне відхилення затримки в міліметровому каналі в умовах міста сягає 1-10 нс, а смуга когерентності каналу - близько 10-100 МГц [5]. Однак, зазначимо, що в дослідженнях застосовувалися антени з великим коефіцієнтом посилення в порівнянні з тими, що зазвичай використовують в ММХ. Тому можливо, що в дійсності шлях сигналу виявиться довшим, ніж у дослідницькій системі, а смуга когерентності – більш вузькою.

1.3 Стійкість до завад ММД

Міліметрові лінії, навіть перебуваючи в безпосередній близькості, дуже слабо впливають одна на одну. Ефекти дифракції, внаслідок малої довжини

хвилі в порівнянні з розмірами антени, теж малі, а значить практично вся енергія йде в головний пелюсток діаграми спрямованості.

Ширина пелюстки, нагадаємо, не перевищує декількох градусів (або навіть частин градуса), будь-які джерела і перешкоди, що в нього не потрапили, для антени практично не спостерігаються [5,6]. Відбивання від металевих поверхонь - дахів, парканів, будівель і т. ін., носять дифузний характер і швидко згасають у міру віддалення від перешкоди. Відсутність бічних пелюсток, вузькі олівцеві діаграми напрямленості і можливість відходу від заважаючих джерел поляризації і частоті привели до того, що в усьому світі на радіолінії цього діапазону поширюються особливі, значно спрощені правила ліцензування та регулювання.

ММХ складається з безлічі базових станцій (БС), що покривають деяку географічну область. Для гарантії гарного покриття базові станції ММХ необхідно встановлювати з більшою щільністю, ніж макростільникові.

Загалом, рекомендується приблизно та ж сама відстань між БС, що і в мікро- і пікостільниках в умовах міста. Передача та / або прийом на ММХ засновані на вузьконапрямлених променях, завдяки чому відсутній взаємний вплив між сусідніми БС і збільшується зона дії ММХ. Це дозволяє розташувати базові станції зі значним взаємним накладанням їх зон покриття. На відміну від стільникових систем, це часткове накладання стільників один на одній дозволяє сформувати більш щільніші ґратки базових станцій для ММХ. Наприклад, для відстані між БС 500м і довжини каналу зв'язку 1км, ММХ-пристрій може встановити з'єднання з 14 БС в ґратці (див. рис.3а). Це підвищує якість каналу зв'язку на краю стільників через зниження взаємного впливу каналів і зменшує нерівномірність якості обслуговування (EGOS) в залежності від положення мобільного пристрою.

1.4 Порівняння ММД (ТГц) з іншими радіодіапазонами

Оскільки можливості подальшого спектрального ущільнення практично вичерпані, то перед зв'язківцями постали задачі освоєння нових діапазонів частот ММД, СММД та оптичного (для атмосферних ліній).

Певних загальноприйнятих меж міліметрового і субміліметрового діапазонів в літературі немає. У більшості випадків границі діапазонів визначені таким чином:

- до міліметрового діапазону хвиль відносять частоти від 30 до 300ГГц, що відповідає довжинам хвиль від 10 мм до 1 мм (рис. 1.4);
- до субміліметрового - від 300ГГц до 1000ГГц (або 1ТГц).

Для швидкості передачі інформації більш ніж 10Гбіт /с безпроводні системи повинні використовувати міліметровій діапазон (а в кращій перспективі - субміліметровій), що робить такі радіосистеми за швидкостями порівняними з волоконно-оптичними.

Діапазон електромагнітних хвиль, що використовуються в радіозв'язку наведено на рис. 1.1.

Дефіцит частот спостерігається при впровадженні таких технологій, як широкосмугова передача даних, цифрове телебачення, цифрове мовлення, стільниковий зв'язок наступних поколінь. При цьому радіо-випромінююча апаратура для різних видів систем, таких як супутниковий зв'язок, радіорелейні системи, бездротові пристрої ближнього зв'язку та ін. потребують різного порядку виділення частот для їх застосування. За останні 7 років ставки на радіочастотній ресурс були підвищені в 11 разів і для розширення систем 3G, 4G, 5G в Україні потрібно розвивати нові технології.

Розподілення радіочастот в Україні подано в таблиці 1.3. Слід зазначити, що дециметрові і сантиметрові електромагнітні хвилі поширюються в основному у вигляді земних хвиль (дифракція таких хвиль виражена слабо) на невеликі відстані, а на великі - за рахунок тропосферного розсіювання на неоднорідностях і, в меншій мірі, за рахунок напрямленої дії тропосферних

хвилеводів. Радіохвилі дециметрового діапазону майже не заломлюються в іонізованих шарах атмосфери і вільно пронизують їх, тобто поширюються як прямі хвилі і тому знаходять застосування в космічному зв'язку; практично не відчують молекулярного поглинання, поглинання в гідрометеорах (дощ, сніг), тобто в земних умовах дециметрові хвилі можуть поширюватися лише прямолінійно в межах прямої видимості. Поширюючись в межах прямої видимості, електромагнітні хвилі в системах стільникового мобільного зв'язку зазнають численних відбивань від оточуючих об'єктів і поглинання в них. Висока несуча частота, малі довжини хвиль і особливості взаємодії випромінювання з атмосферою визначають основні переваги та недоліки міліметрових хвиль. В тумані і задимленості вузьконаправленість передачі ММД при 60ГГц (вікно поглинання) має переваги для організації мікростільників з низьким енергоспоживанням.

Як стверджують розробники компанії Huber + Suhne, ґратка розміром 20 × 20см дозволяє формувати в діапазоні 60ГГц промені шириною менше 2 градусів і має коефіцієнт посилення на рівні 30дБ, які найчастіше використовуються в компактних радіомостах діапазону 60ГГц.

Головною перевагою використання міліметрових і субміліметрових систем зв'язку є можливість досягнення гігабітних швидкостей передачі даних.

Завдяки високочастотній несучій для передачі даних можна задіяти широкі смуги частот - аж до 5 ГГц в кожному напрямку в повнодуплексному режимі (80-гігагерцевий діапазон об'єднує дві смуги частот: 71-76 і 81-86ГГц) і використовувати відносно прості методи модуляції. Це дозволяє знизити навантаження на сигнальний процесор і вартість реалізованої схемотехніки, а в перспективі - довести швидкість до 10Гбіт/с або навіть вище.

Для використання в Е-діапазоні виділені в цілому майже 13ГГц частотного спектра: 10ГГц в діапазонах 71-76 та 81-86 ГГц і ще 3ГГц в діапазонах 92-94 та 94,1-95ГГц, що в кілька разів перевищує всі виділені до цього вільні частотні ресурси, передбачений спрощений порядок реєстрації -

вузькі «олівцеві» діаграми напрямленості [5]. Міліметрові довжини хвиль і відносно великі (30-60 см) діаметри антен дозволяють формувати вузькі, шириною менше 1-2 градусів, діаграми напрямленості. Діаметр плями засвітлення такого радіомосту на відстані 2км може не перевищувати 14м: спроба реалізації антен з такими характеристиками в низькочастотних діапазонах, швидше за все, була б приречена на комерційний провал. Проте, при розрахунках трас потрібно враховувати умови прямої видимості і першу зону Френеля - в межах шести десятих її радіусу від лінії візування не повинно бути ніяких перешкод. Слід зазначити, що занадто вузькі діаграми напрямленості можуть ускладнювати використання ліній міліметрового діапазону на щоглах і високих будівлях, здатних відхилитися під поривами вітру або скручуватися внаслідок температурних градієнтів на кілька градусів.

Радіопрозорість ММД: велике дерево, діаметр крони якого досягає 10 м, здатне послабити ММВ-сигнал на 20 дБ. Проте хвилі міліметрового діапазону легко проникають через незначні перешкоди, які є непереборною перешкодою для світла, - наприклад, фарбу, шар пилу, пластмасу або навіть корпус мікросхеми.

Дощ, скоріш за все, найбільш серйозна проблема для ММХ-ліній. Згасання сигналу під час сильної зливи може досягати 10дБ/км. Однак такі дощі в середніх широтах спостерігаються рідко і закінчуються швидко: за словами Миколи Мацнева, генерального директора компанії «НТЦ ФІОРД», активно використовуються міліметрові радіомости, максимальна тривалість відмови лінії зв'язку внаслідок дощу за весь час експлуатації не перевищила 22 хв. – втім, цілком достатніх для того, щоб клієнт почав обривати телефони операторів [9].

Дощі і викликане ними послаблення сигналу 30-50 дБ / км є основним обмежуючим фактором для дальності міліметрових ліній. Однак коли потрібно забезпечити доступність на рівні 99,995%, відстань скорочується вдвічі, до 2,4 - 3,6 км погодних умов.

Розширюється і область застосування міліметрових радіоліній: дослідники з Stony Brook University і NEC Laboratories починають серйозно замислюватися про використання міліметрових магістралей для організації міжз'єднань в центрах обробки даних.

Як очікується, споживання бездротових радіоінтерфейсів 10 Гбіт/с не перевищить 1 Вт, при цьому бездротова радіо-частина (фазована антенна ґратка займе на лицьовій панелі сервера не більше 5×5 см) забезпечить автоматичну комутацію радіомагістралей, позбавить ЦОД від пучків кабелів і помітно поліпшить умови охолодження апаратури.

У зв'язку з високою щільністю базових станцій ММХ вартість їх підключення до дротової опорної мережі дуже значна. Одне з рішень щодо зниження цієї вартості (і прискоренню розгортання) - дозволити деяким БС ММХ зв'язуватися у службових каналах з іншими БС. За рахунок формування вузької діаграми напрямленості з великим коефіцієнтом посилення службовий канал зв'язку між станціями і канал зв'язку з мобільним пристроєм можуть діяти на одній частоті, не заважаючи один одному. Це сильно підвищує гнучкість розміщення базових станцій ММВ і дозволяє досягти більшої щільності їх розташування, ніж в фемтостільниках і гібридних мережах в діапазоні до 3ГГц.

Таким чином, коли необхідно організувати безперебійну роботу практично в будь-яких умовах і забезпечити операторський зв'язок навіть на відносно довгих трасах, оптичні атмосферні і міліметрові лінії можуть включатися в паралель і вигідно доповнювати один одного в моменти несприятливих для кожної з них погодних умов .

Використання діапазону радіохвиль (30 до 300 ГГц) ефективно для майбутніх поколінь зв'язку, зокрема, 5G, для високошвидкісної передачі даних більш 1 Гбіт/с.

Сучасні досягнення в оптоелектроніці та напівпровідниковій техніці дозволяють створювати пристрої генерації в діапазоні 30-400 ГГц.

1.5 Застосування оптичного та радіочастотного спектру в багаторівневій структурі мережі

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

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

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

атмосфері (рис. 1.5), особливо в вікнах поглинання атмосфери. В області 100 ГГц досліджуються явища перевипромінювання в атмосфері.

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

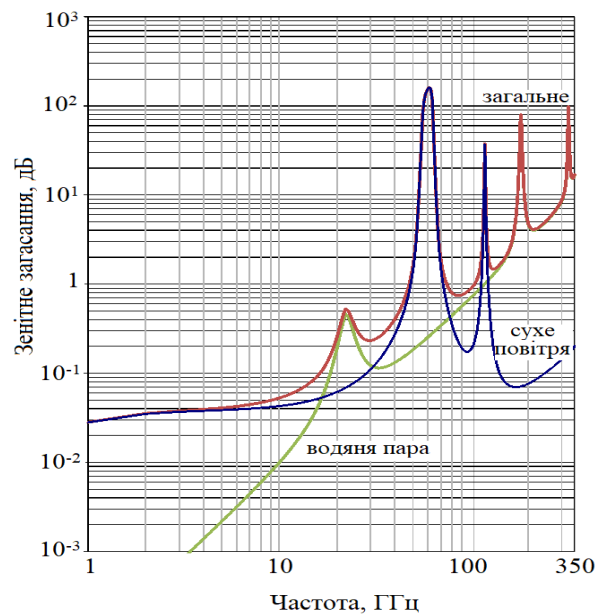


Рис.1.5. Загальна зенітне загасання, загасання в сухому повітрі і водяній парі (тиск = 1013,25 гПа; температура = 15 ° С; щільність водяної пари = 7,5 г/м³)

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

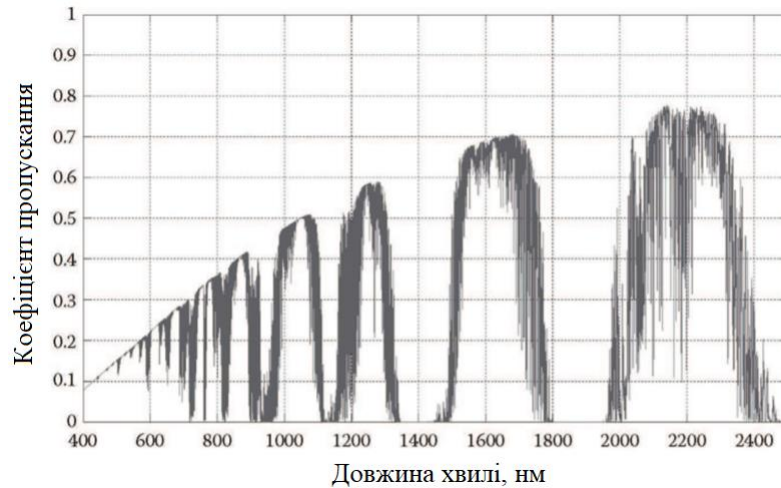


Рис. 1.6. Коефіцієнт пропускання атмосфери в залежності від довжини хвилі

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

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

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 пропускнуою здатністю доповнюють (а в деяких конкретних випадках конкурують) з наземними волоконними мережами високої пропускнуої здатності. Optical Communications може забезпечити дуже гнучкі можливості космічної мережі, які можуть впоратися з високими вимогами до даних.

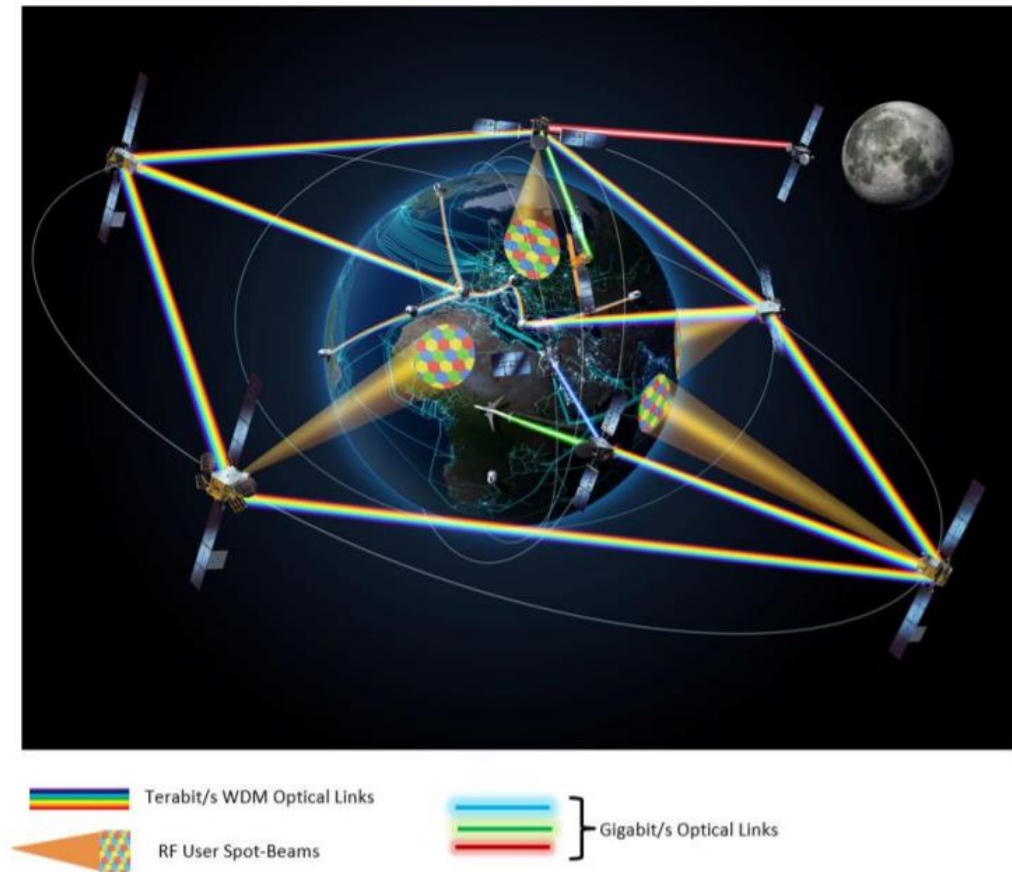


Рис. 1.7. Концепція проекту HydRON для повної оптичної космічної мережі, інтегрованої в інфраструктуру наземної мережі

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 міжспутникових 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 ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ ДЛЯ СИСТЕМ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

2.1 Загальна характеристика і особливості цифрових систем зв'язку стандарту 5G

Свого часу Міжнародний союз електрозв'язку закликав мобільну спільноту не висловлюватись у термінах, що позначають порядковий номер поколінь систем ІМТ, посилаючись на те, що введені раніше терміни «Наступні системи» («ІМТ і наступні системи») і «майбутнє розвиток ІМТ-2000» вживалися як тимчасові. У Резолюції МСЕ-Р № 56 «Визначення назв для міжнародного рухомого електрозв'язку» пояснюється співвідношення між термінами «ІМТ-2000» і «майбутній розвиток ІМТ-2000», а також наводяться нові назви систем, які включають нові радіоінтерфейси з можливостями наступних систем. Відповідно до зазначеної резолюції, використання терміна «ІМТ-2000», як і перш, підходить для опису ІМТ-2000, а крім того, під ним слід розуміти удосконалення і майбутній розвиток цих систем. Термін «ІМТAdvanced» слід застосовувати до систем, компонентів систем і пов'язаних з ними аспектів, які включають нові радіо інтерфейси, що підтримують нові можливості подальших систем. Кореневою назвою є термін «ІМТ», що охоплює одночасно ІМТ-2000 і ІМТ-Advanced.

«5G» (5-е покоління мобільних мереж або 5-е покоління бездротових систем) - назва, яка сьогодні неофіційно використовується в деяких дослідних проектах для позначення наступних стандартів мобільного зв'язку, які продовжують стандарти попередніх поколінь (Офіційного 3G і умовно введеного 4G). Таким чином, 5G не є офіційним терміном для позначення будь-якої конкретної специфікації і, як наслідок, нові стандарти щодо подальшого розвитку нині діючих систем LTE не розглядаються органами стандартизації в якості нового покоління систем мобільного зв'язку, а

вважаються лише частиною діючих стандартів. У технологічному плані спільна позиція з цього питання викладена компанією Ericsson. У цьому документі зазначається, що сьогодні існує цілий ряд додатків, які вимагають дуже малих тимчасових затримок в мережі (Дистанційні вимірювання, забезпечення безпеки дорожнього руху, управління виробничими процесами і т. д.), високого рівня надійності мережі (управління критичною інфраструктурою - мережі передачі електроенергії, індустриальний контроль та забезпечення таких життєво важливих соціальних функцій, як транспорт, телемедицина, управління «Розумним» містом і будинком), а також відповідних форматів швидкої передачі різних обсягів даних (великих обсягів - при віддаленому відеоспостереженні, малих - при відстеженні руху вантажів і т. д.). У розвиток цієї позиції виділяється ряд конкретних вимог, які не можуть бути задоволені за допомогою існуючих мереж зв'язку.

До них відносяться:

- Швидкість доставки призначених для користувача даних в будь-якій точці в сотні мегабіт в секунду;

- Надвисока пропускна здатність (кілька гігабіт на секунду) в визначених сценаріях; це може бути досягнуто в мережах зі надщільною архітектурою при дуже широкій смузі радіоканалу (кілька сотень мегагерц) в більш високих діапазонах частот (10-100 ГГц);

- З'єднання великої кількості комунікаційних пристроїв машинного типу, що мають низьку споживану потужність. У стандартах LTE цей аспект вже розглядається, але поки, на даній стадії, розвинути LTE таким чином, щоб виконати всі додатки з їх особливими специфічними вимогами, буде важко - потрібно альтернативні технології, повно забезпечуючи можливість з'єднання пристроїв з обмеженим споживанням енергії;

- Найближча комунікація, коли необхідно підтримувати з'єднання між близько розташованими користувачами або об'єктами (наприклад, між транспортними засобами при забезпеченні безпеки дорожнього руху). Така комунікація може бути більш ефективною, якщо обмін інформацією

здійснюється безпосередньо між пристроями (Device-to-Device, D2D), минаючи мережеву архітектуру;

- Ефективне використання споживаної електроенергії, яка в перспективі матиме ще більше значення і повинна істотно вплинути на дизайн мережі радіодоступу в 5G.

Основні вимоги до 5G можна розподілити за кількома доменами, а оскільки вони знаходяться сьогодні в стадії попереднього бачення, то носять загальний характер: «що приблизно повинно бути». Вимоги до 5G в форматі виділяють чотири домена:

- Новий радіо інтерфейс з малими стільниками (New Air Interface (Small Cells)) повинен базуватися на нових формах коливань (New waveform), нових видах дуплексу (New duplexing), простих і гнучких протоколах канального рівня (Light MAC), високих порядках модуляції (Higher order modulation), ефективних методах компенсації внутрішньо системних завад (Interference cancelation / utilization) і багатомірних антенних системах (MassiveMIMO);

- Нова архітектура радіомережі (New NW Architecture) - розподілення і управління ресурсами в гетерогенній архітектурі HetNet (HetNet resource allocation & management), Реконфігуроване радіо - та елементи мереж SDR і SDN (Software Defined Radio, Software Defined Networks), передача призначених для користувача даних і керуючої інформацією (службових команд) в різних фізичних середовищах (Physical separation between data & control planes);

- Радіочастотний ресурс (Radio Frequency) - використання високих діапазонів частот, включаючи діапазон міліметрових хвиль (Millimeter wave), новий режим ліцензування (New licensing regime), використання ліцензованого і не ліцензованого спектру (Licensed & unlicensed band operation), спільне використання спектру (Spectrum sharing), комбіноване застосування спектру всередині приміщень і в зовнішньому середовищі (Indoor-Outdoor operation);

- Інтелектуальні і адаптивні мережі (Intelligent & Adaptive Networks) - адаптивне використання мережевих ресурсів (Opportunistic & adaptive use of

resources), виявлення доступного спектру (Spectrum sensing) і його використання на принципах когнітивного радіо (Cognitive radio and network), самоврядні (самостійну конфігурацію) і автоматизовані мережі (Selfmanagement and automated networks, Automation (Plug & play)).

Втім сьогодні, при відсутності навіть попередніх специфікацій мереж 5G, занурення в технічні деталі виглядає передчасним. Тому перелічимо ще ряд характеристик, які відрізнятимуть мережі п'ятого покоління від попередників:

- Розподілений доступ до гігантської смуги пропускання;
- Поліпшені інтерфейси систем білінгу, що помітно спростять роботу;
- Дистанційна діагностика проблем в мережі, що дозволить оперативно усувати позаштатні ситуації;
- Спеціальні засоби для спостереження за роботою абонентів, які дозволять швидко реагувати на виникаючі у них труднощі і приходити на допомогу;
- Високоякісні сервіси, що базуються на спеціальних політиках;
- Підтримка до 65 тис. одночасних з'єднань на одну базову станцію;
- Підтримка віртуальних приватних мереж.

2.2. Аналіз розвитку систем мобільного зв'язку п'ятого покоління

Незважаючи на те, що перша мережа четвертого покоління була запущена в Норвегії вже 4 роки тому, Європа досі помітно відстає від Америки і Азії за рівнем проникнення широкосмугового доступу в Інтернет. Так, за оцінками GSMA, в 2013 році цей показник в країнах Євросоюзу становив всього 59% (виняток - Швеція з традиційно найвищим проникненням ШСД на рівні 128%) у порівнянні з 82% в США, 108% в Південній Кореї, 112% в Японії і 78% в розвинених країнах. Прагнучи надолужити згаяне, рік тому Європейський союз проявив ініціативу зі створення першої робочої групи для розробки концепції будівництва мереж п'ятого покоління, 5G [11,12].

У проєкт METIS («Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society », « Способи реалізації мобільного та бездротового зв'язку в інформаційному суспільстві 2020 ») увійшли п'ять виробників на чолі зі шведською Ericsson, 5 операторів зв'язку, 13 науково-дослідних організацій і один автомобільний гігант. За два з половиною роки, які відведені проєктом, його учасники повинні розробити основну концепцію, зрозуміти, на базі яких технологій будуть розгортатися нові мережі, яким вимогам вони повинні відповідати. Оптимізація і стандартизація обладнання, а також перші дослідні запуски заплановані на 2015-2018 роки, а в 2018-2020-му очікується розгортання перших некомерційних мереж 5G для досвідченої експлуатації. Таким чином, комерційний запуск мереж п'ятого покоління, відбудеться не раніше 2020 року [11,12].

Мережі п'ятого покоління повинні будуть вирішувати ті завдання, які сьогодні являють складність для більшості операторів зв'язку, а в недалекому часі, у міру зростання трафіку, стануть критичними. Йдеться, наприклад, про забезпечення ідеальної якості зв'язку та передачі будь-якого обсягу даних на стадіоні або концерті, в процесі медичної операції або для регулювання дорожньої ситуації, а ще про величезну кількість ситуацій, про виникнення яких ми сьогодні можемо тільки здогадуватися.

З'являються нові сценарії розгортання мереж, зокрема все більше операторів будуть вдаватися до стратегії розгортання малих стільників. Крім того, як відзначають в Ericsson, зміни відбудуться і в парадигмі комунікацій в бік все більшого впливу міжмашинної взаємодії.

Нові системи повинні будуть забезпечувати гігабітні швидкості передачі даних (в 10-100 разів вище нинішніх), володіти незрівнянно більшою ємністю, щоб відповідати зросту споживаного трафіку в 1000 раз (до 500 Гб на користувача в місяць) при збільшенні підключених пристроїв в 10-100 разів. Вони повинні бути супернадійними і забезпечувати буквально миттєву передачу даних (час реакції - до мілісекунд), а також довгострокову роботу пристроїв з невеликим енергоспоживанням.

За прогнозами експертів, в кінцевому підсумку буде підключено все, що може виграти від підключення в мережі, починаючи від побутової техніки і світлофорів до автомобілів, медичного обладнання, систем електропостачання, сенсорних датчиків вітру і дощу. Завдання мереж п'ятого покоління - забезпечити реалізацію цих технологій.

Що стосується технічних характеристик, поки можна лише сказати, що на відміну від попередніх мереж, нові системи будуть використовувати вже існуючі технології мобільного і бездротового зв'язку (GSM, HSPA, WiFi, LTE-A), доповнюючи їх новими технологіями радіодоступу, призначеними для кожного окремого сценарію. Залишається відкритим і питання про використаний радіочастотний спектр. Для задоволення сформульованих вимог потрібно надщільне розгортання мереж, базові станції яких будуть використовувати дуже широку смугу пропускання (кілька сотень МГц з можливістю розширення до декількох ГГц) в верхніх діапазонах частот - 10-100 ГГц. Мережі будуть складатися з малопотужних базових станцій, що встановлюватимуться поза приміщеннями на відстані ліхтарних стовпів, всередині приміщень - в кожній кімнаті. Незайняті високочастотні діапазони полегшують завдання забезпечення широкої смуги пропускання, а також більш підходять для передачі даних на короткі відстані.

Стрімкий розвиток інформаційних технологій часом перевершує всі наші очікування і найсміливіші фантазії, тому навряд чи можна напевно передбачити, які відкриття чекають нас в найближчі 7 років. Однак вже сьогодні учасники проекту METIS розробляють сценарії, моделюють ситуації, визначають потреби кінцевого користувача і намагаються зрозуміти, які саме технології зможуть максимально повно вирішити ті завдання, які стоятимуть перед операторами зв'язку вже в самому найближчому майбутньому. Незважаючи на те що поки питань більше, ніж відповідей на них, очевидно одне: впровадження мереж п'ятого покоління стане черговим революційним кроком в освоєнні цифрового простору, який кардинальним чином вплине на

всі сфери життя і бізнесу. І в лідерах виявиться той, хто зуміє раніше інших розглянути і використовувати відкриття на цьому етапі можливості.

Сьогодні найкращою технологією мобільного зв'язку вважається LTE (Long Term Evolution) - мережі четвертого покоління (4G). Вона забезпечує теоретичну швидкість передачі даних до 326 Мбіт/с в напрямку від базової станції на клієнтський пристрій. На ринку присутні близько 700 різних пристроїв з підтримкою LTE, включаючи USB-модеми і Wi-Fi-роутери. І хоча LTE досить нова технологія, вже проєктуються мобільні мережі п'ятого покоління (5G), що обіцяють в десятки разів вищу пропускну здатність.

Над 5G в числі інших працює Samsung. Для високошвидкісної передачі даних пропонується використовувати міліметровий діапазон радіохвиль з частотою від 3 до 300 ГГц. За оцінками Samsung, регулятори можуть дозволити використання спектра шириною до 100 ГГц. Теоретично мобільні мережі п'ятого покоління дозволять передавати інформацію зі швидкістю до 10 Гбіт/с, що задовольнить будь-які сучасні потреби по завантаженню контенту.

Перевагами міліметрового діапазону вважаються дуже висока пропускну здатність каналів зв'язку і квазіоптична форма поширення випромінювання, при якій відсутня інтерференція і пов'язані з нею перешкоди. Однак застосування радіохвиль міліметрового діапазону загрожує деякими проблемами. Справа в тому, що такі сигнали втрачають енергію при передачі на великі відстані: зокрема, згасання виникає через поглинання електромагнітного випромінювання молекулами кисню і води [14,15]. В Samsung пропонують обійти труднощі, застосувавши спеціалізований масив антен. Компанія розробила прототип електронної системи з 64 антенами, пов'язаними зі схемами обробки сигналів. Цей приймач здатний формувати сигнал шириною 10 градусів з динамічною зміною напрямку передачі. Експерименти показали, що система дозволяє обмінюватися даними зі швидкістю понад 1 Гбіт/с з двома приймачами, що переміщуються зі швидкістю близько 8 км/год. Відстань при цьому становить приблизно 2 км

при прямій видимості. У мережах зв'язку п'ятого покоління будуть переважати не високі швидкості передачі даних, а диференційований підхід до різних пристроїв і зосередженість на кінцевій послугі. У той час, як стільникові оператори тільки починають розгортати мережі зв'язку 4G на LTE, вже сьогодні в лабораторіях йдуть дослідження мереж наступного покоління 5G.

Мережі 5G будуть обслуговувати дуже багато мобільних пристроїв, починаючи від телефонів, смартфонів, планшетів і закінчуючи наприклад різними датчиками (автономні температурні сенсори, HD-відеокамери спостереження, які транслюють онлайн великий потік відео). Оскільки пристрої різні і швидкості передачі у них різні, то у різних пристроїв різні запити на якість мережі. Сьогодні таким запитам задовольняють тільки провідні мережі. В стільникових мережах на сьогодні поки немає гарантії заявленої якості мережі. У мережах 5G працюватимуть в 10-15 разів більше кінцевих пристроїв, які не є стільниковими телефонами. І розвиток мереж 5G буде залежати від їх можливості працювати з такими різними пристроями.

Зараз стільникові оператори намагаються збільшувати швидкість передачі даних, але це не головне. Головне щоб всі програми працювали саме з тією швидкістю, з якою потрібно, з якою користувач очікує, щоб вони працювали. При таких багатообіцяючих перспективах залишається тільки дивуватися, до яких пір абоненти будуть змушені задовольнитися роботою в мережах четвертого покоління? Для наших співвітчизників, які можливостей мереж 4G поки не оцінили, питання явно не пусте. Існує точка зору, згідно з якою нове покоління мереж мобільного зв'язку з'являється приблизно раз в десять років. Перші такі мережі виникли в 1981 році, мережі 2G - в 1992 році, мережі 3G - в 2001 році, а перша мережа четвертого покоління (LTE) була запущена в Швеції оператором TeliaSonera в самому кінці 2009 року. Якщо йти за цією логікою, то мереж 5G ми не побачимо до 2020 року. До речі, в 2008 році, практично одночасно з розгортанням перших мереж pre-4G, в Південній Кореї була запущена програма досліджень і розробок в області 5G, хоча автору не вдалося знайти будь-яких звітів про результати, досягнутих за минулі роки.

Можливо, з цієї причини в жовтні 2012 року при британському Університеті Суррея був створений центр досліджень мереж 5G, підтриманий одним з інвестиційних фондів уряду Великобританії, виробниками інфраструктурного обладнання Fujitsu, Huawei, Rohde & Schwarz, Samsung і оператором Telefonica Europe [11,12,15].

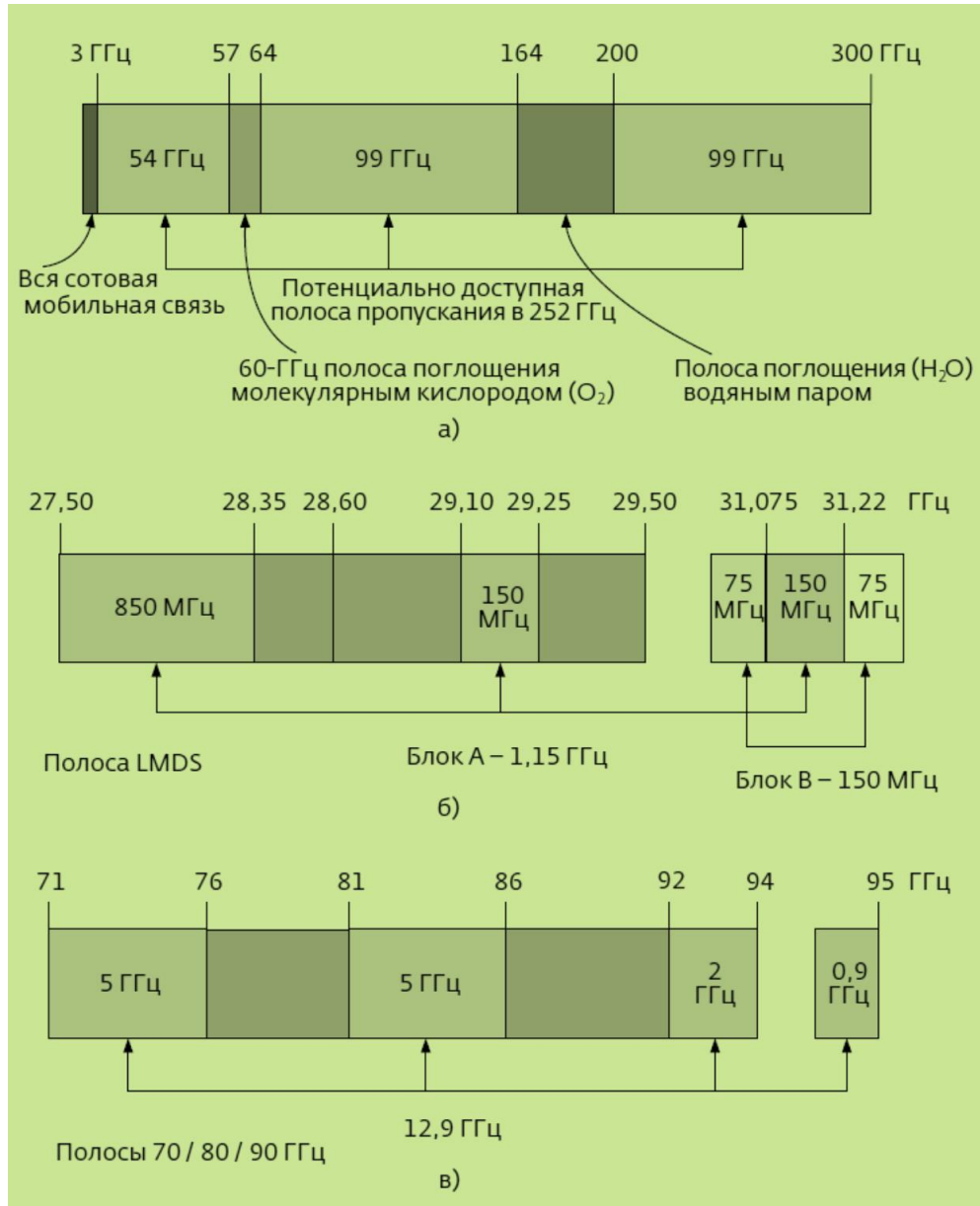


Рисунок 2.1. Спектр в міліметровому діапазоні: а) смуги, доступні для широкопasmового мобільного зв'язку; б) ліцензовані діапазони LMDS; в) E-діапазон

2.3 Гібридні системи зв'язку

Гібридна система MMB-4G зможе поліпшити покриття і гарантувати плавність зв'язку для мобільних користувачів. На початковому етапі розгортання мережі MMB щільність БС буде невелика, тому неминучі лакуни в зоні покриття мережі. Однак очікується, що до моменту початку широкого розгортання MMB вже створені системи 4G забезпечуватимуть хороше покриття і надійність. У гібридних MMB-4G мережах системна інформація, службові канали зв'язку і зворотний зв'язок передаються по 4G-каналах, а в міліметровому діапазоні - високошвидкісні потоки даних.

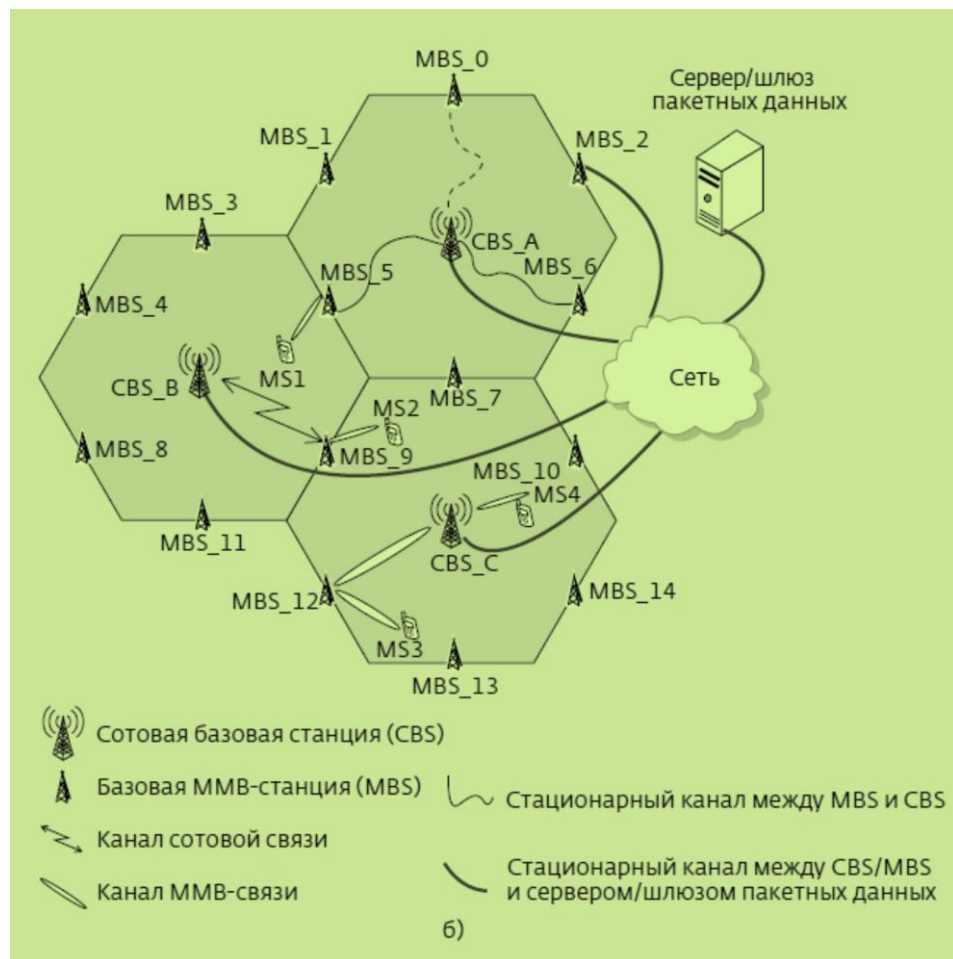


Рисунок 3.9 – Гібридна мобільна мережа MMB-4G[8]

У порівнянні з міліметровим діапазоном, радіохвилі в діапазоні до 3 ГГц краще проникають крізь завади і дозволяють працювати поза зоною прямої видимості або при загасанні сигналу іншої природи (різноманітні середовища

поширення, дощ, і т. ін.). Таким чином, в гібридній мережі вигідно використовувати частотні канали стільникового зв'язку для передачі службової інформації, а міліметрові канали - для високошвидкісної передачі даних.

Гібридні системи зв'язку на даному етапі розвитку фотоніки та електроніки, а саме поєднання електронних та оптичних пристроїв дозволяє досягти рекордних швидкостей передачі даних. Так, при необхідності перенесення ТГц-сигналів (0,1-10 ТГц) на далекі відстані, коли ТГц випромінювання вже сильно ослаблені в атмосфері, застосовують технологію модуляції на ТГц частотах оптичних сигналів, які передаються по волокну. При такому підході генерація ТГц сигналу здійснюється технологіями фотоніки. Застосування оптоволоконних кабелів дозволяє передавати високочастотні радіосигнали на довгі відстані. Крім того, безумовною перевагою підходу на основі фотоніки є той факт, що оптоволоконні і бездротові комунікаційні мережі можуть з'єднуватися з точки зору швидкості передачі інформації і формату модуляції.

2.4. Аналіз технічних вимог та енергетичних параметрів для реалізації технології 5G

Як вважають провідні світові вендори, мережі 5G повинні забезпечувати можливість росту обсягу переданих даних більш ніж в 1000 разів в кожній області обслуговування за рахунок підвищення спектральної ефективності, використання нових радіочастотних діапазонів і гетерогенних мереж (питома пропускна здатність на одиницю площі покриття ASE = 1,5 ... 60 Гбіт/с/км²); збільшення від 10 до 100 разів кількості підключених абонентських пристроїв (до 300 тис. на вузол доступу; в даний час технологія LTE забезпечує роботу до 200 абонентів в соті зі швидкостями 100/50 кбіт/с в лініях вниз / вгору відповідно); збільшення від 10 до 100 разів типових швидкостей передачі даних на стороні користувача; подовження в 10 разів терміну служби батарей

для абонентських пристроїв з низькою потужністю; зниження в 10 разів затримки в ланцюжку «end-to-end» менше 1 мс проти 10 мс в LTE, Таблиця 2.1.

Таблиця 2.1 – Підвищення основних технічних параметрів для мереж 5G

Швидкість передачі даних	Зростання в 10–100 раз в розрахунку на абонента — до 10 Гбіт/с (UL) і до 5 Гбіт/с (DL)
Споживаний трафік абонента	Зростання в 1 000 раз — до 500 Гб на користувача в місяць
Кількість абонентських пристроїв	Збільшення кількості підключаючих абонентських пристроїв соти в 10–100 (до 300 000 на узел). Зростання M2M пристроїв з 50 млрд. до 500 млрд
Термін життя батарей	Десятикратне збільшення часу автономної роботи абонентських пристроїв з невеликим енергоспоживанням, таких як сенсори M2M
Затримки в мережі	Скорочення часу затримки в ланцюжку E2E з 5 мс до 1 і менше
Енергоефективність	Зниження вартості експлуатації та енергоспоживання мереж 5G до 10% від поточного споживання мереж 4G

Аналіз необхідного радіочастотного ресурсу для реалізації технологічних рішень 5G. Реалізація наведених вище технічних умов, особливо до підвищення швидкостей передачі даних, вимагає істотного розширення доступу до РЧС операторів 5G і визначення нових смуг частот для розвитку мереж радіо доступу (рис.2.2).

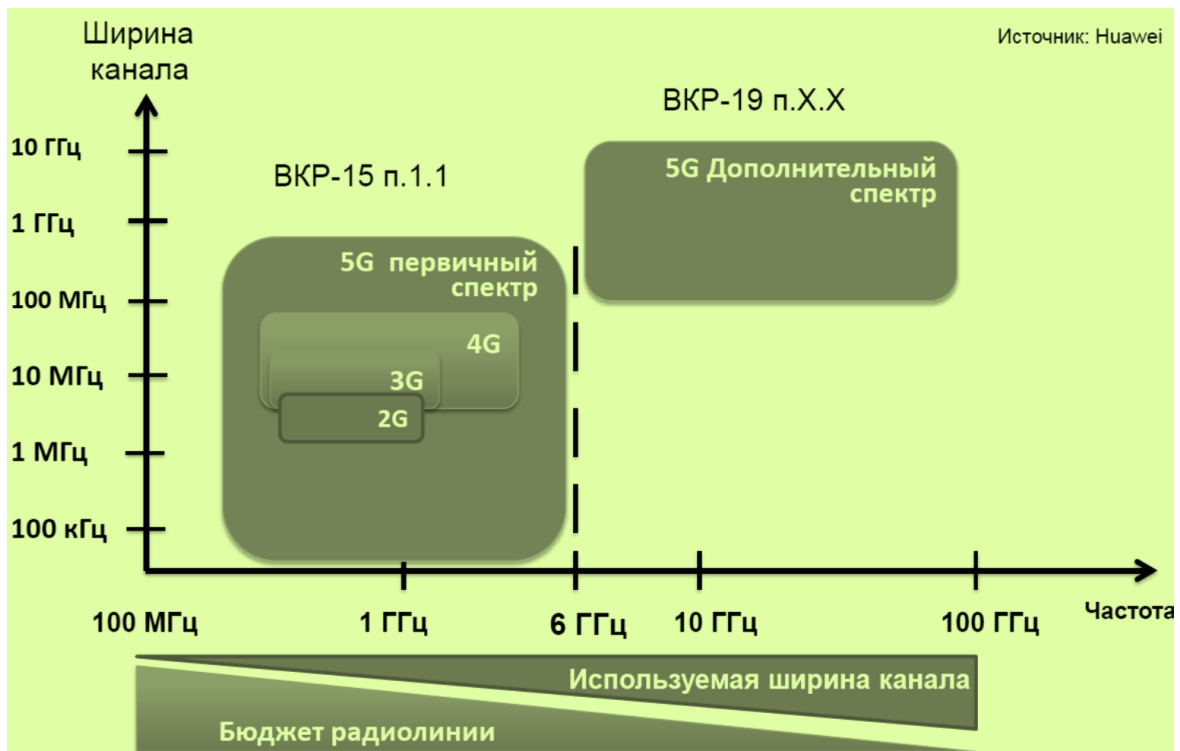


Рисунок 2.2 – Розширення спектра (ширини каналу) при переході до технології 5G

Всередині смуги 3-300 ГГц частоти аж до 252 ГГц можна використовувати для широкосмугового мобільного зв'язку. Якщо виключити діапазони, в яких хвилі сильно поглинаються киснем і водяними парами в атмосфері (57-64 ГГц і 164-200 ГГц), оскільки можливості передачі в них обмежені, тоді решти 40% спектра має цілком вистачити для ММВ, відповідних спектру в 100 ГГц. Це більш ніж в 200 разів більше, ніж використовується зараз для мобільного зв'язку в діапазоні до 3 ГГц. Міліметровому діапазону відповідає 70 ГГц частотного ресурсу.

Е-діапазон складається з двох частотних смуг 71-76, 81-86 ГГц і 92-94 ГГц, де поглинання киснем становить менш ніж 0,5 дБ км (див. рис.2.3) і відкриває в цілому 13 ГГц спектру радіочастот, що робить ідеальним їх використання для високошвидкісних каналів передачі даних на відстані до декількох кілометрів.

Е -діапазон в 50 разів більше спектра всіх видів стільникового зв'язку, прийнятого в США, і значно перевищує всі зв'язкові СВЧ-діапазони. Таке велике охоплення частот здатне забезпечити роботу цілого покоління нових систем бездротового зв'язку (рис.2.3).

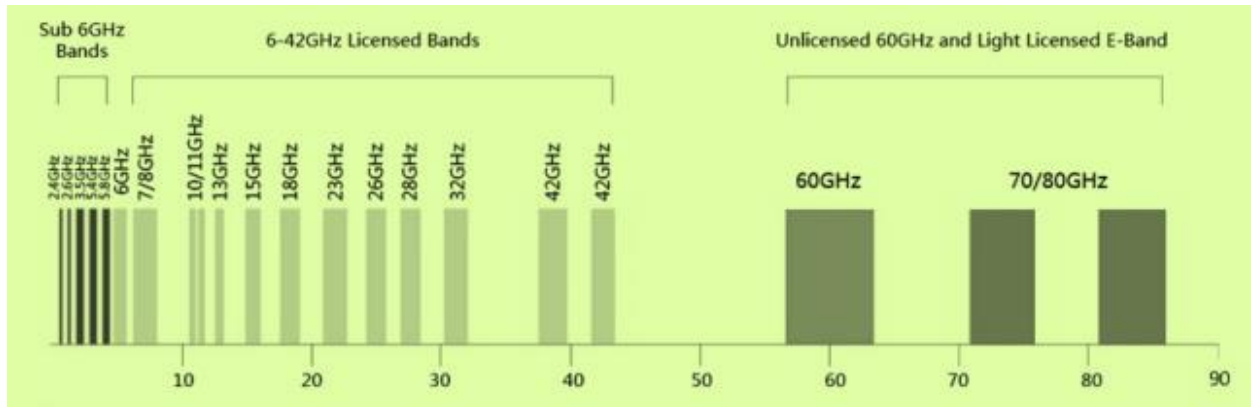


Рисунок 2.3 - Частоти виділені для мобільного зв'язку та інших радіослужб США і перспективні для використання частоти в ММД [10]

З точки зору поширення радіохвиль Е-діапазон аналогічний діапазонам частот 38/42ГГц, і йому відповідають типові дальності порядку декількох кілометрів (точні значення розраховуються на основі очікуваної інтенсивності опадів і вимог по надійності).

Порівняння технічних вимог до мереж мобільного зв'язку 4G і 5G

Розширення смуги частотних каналів, які будуть використовуватися в 5G, і підвищення спектральної ефективності технологій дозволять на порядок збільшити швидкості передачі даних в мережі. Як випливає з табл. 3, мережі 5G використовуватимуть частотні канали з шириною більше 100 МГц і спектральна ефективність мереж 5G за рахунок використання нового виду модуляції буде в кілька разів перевищувати досягну в мережах 4G (рис.2.4 [10]).

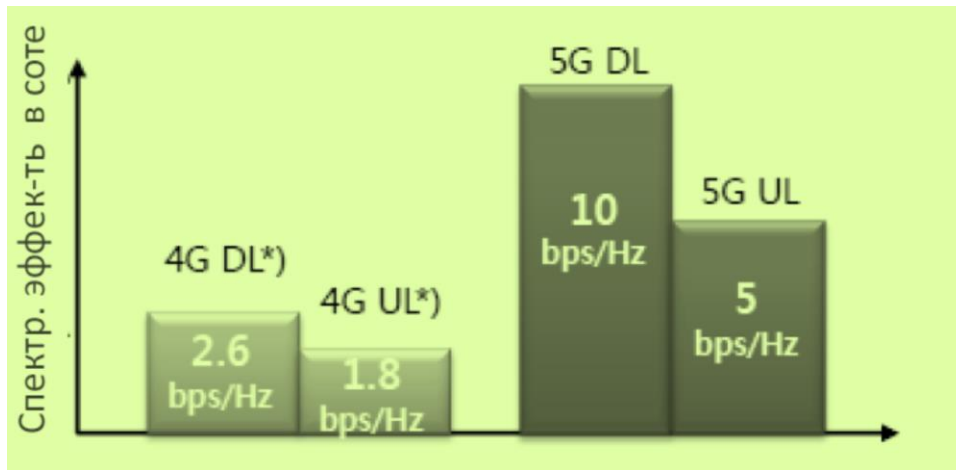


Рисунок 2.4 – Спектральна ефективність в стільнику для технології 5G [10]

2.5 Оптиелектронна обробка радіочастотних сигналів та рішення інтеграції безпроводових та волоконно-оптичних технологій

Основні мережеві рішення, де застосовуються інтегровані волоконно-ефірні технологій 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 оптиелектронні 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 оптиелектронними 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 перспективою 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.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОКРИТТЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ НАЗЕМНИХ РАДІО ТА ОПТИЧНИХ СИСТЕМ.

Для систем з міліметровими хвилями (ММС) прогнозується застосування вузькоспрямованої передачі сигналу з кутом розкриття антени менше одного кута, технологія МІМО, адаптивні гібридні технології для розподілу ресурсів та подолання послаблення сигналу, підвищення продуктивності мережі. Передбачається також використання малих розмірів антен MMW з сотнями випромінюючих елементів.

Здебільшого, ММВ використовуються в таких сервісах: організація зв'язку на надкоротких відстанях, високошвидкісні системи бездротового зв'язку, такі як бездротовий гігабітний Ethernet, нестиснута відеопередача, якість UHD, стратосферна та транзитна передача и т. ін. Частотні потенціальні мереж MMW вже ініціювали декілька дій щодо стандартизації, наприклад, бездротові персональні мережі (WPAN) та бездротові локальні мережі (WLAN). Були створені стандарти для IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad, консорціума WirelessHD, бездротового гігабітного альянсу (WiGig), а також нещодавно створеної дослідницької групи IEEE 802.11ay. Названі вище стандарти працюють в області 60 ГГц.

Для побудови мобільних мереж найбільш цікаві наступні смуги атоот, які знаходяться у вікнах прозорості атмосфери 28 ГГц и 71-76 / 81-86 ГГц (E-діапазон). Високі втрати при проходженні MMW крізь більшість завад в міському розвитку роблять їх придатними тільки для невеликих комірок (пікомереж), тому ймовірно, що з цією базовою станцією буде працювати невелика кількість споживачів [41,42]. Таким чином, перед експертами постає питання про використання ефективності мультиплексування з ортогональним частотним розподілом (OFDM) на рівні доступу, а також використання складних багатопозиційних методів модуляції, особливо у міській умовах

[43]. Найбільш відповідними параметрами доступу є методи множинного доступу TDMA, ALOHA та одночастотної (SCM), а також повторове мультиплексування каналів.

3.1 АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ПОШИРЕННЯ СИГНАЛІВ

Між міліметровими хвилями радіосистем та класичними, що працюють у мікрохвильовому діапазоні, наприклад, 2 та 5 ГГц, існують фундаментальні відмінності, починаючи з фізичного рівня. Найбільш відмінними та фундаментальними є механізми втрати сигналу ММБ та розсіювання. Тому оцінка рівня шуму, характеристики завад та модель згасання сигналу в атмосфері у міському сценарії є ключовими задачами побудови ефективної системи зв'язку. В даний час переважно використовуються розрахункові моделі, засновані на наближенні до рівняння в Фрііса. Слід зазначити, що радіохвилі у цій смузі, на відміну, наприклад, від хвиль дециметрового діапазону, мають менші дифракційні властивості та більш наближені до квазіоптичних властивостей поширення. Існує також різниця у дисперсіях гідрометеорів, пилових та аерозольних утвореннях. Найчастіше застосовують наведені нижче моделі:

- рівняння Фрайса;
- модель Окамури;
- модель Хати (Хата-Окамура);
- модель COST-231.

В цих розрахунках найбільш значним у порівнянні з іншими втратами є згасання у «вільному» просторі, яке пропорційне квадрату несучої частоти. Проте такі спеціалісти, Жою П., Фарук Х. (Samsung Electronics), Шахнович И відмічають помилки цієї моделі для радіосистем ММД з вузькою діаграмою спрямованості. Навіть Скляр Б. наголошує про геометричний ефект згасання у «вільному» просторі у тракті передачі для певної частоти між двома ізотропними антенами. Тому вважається необхідним проаналізувати

математичну модель розрахунку енергетичних втрат у радіолінії ММД, щоб повністю оцінити енергетичний та частотний потенціалні ресурси радіосистем, що працюють у цьому діапазоні. Формулу (3.1) вперше була опубліковано в 1945 році для радіосистем метрового та дециметрового діапазонів хвиль, які освоювались в той час :

$$\frac{P_1}{P_2} = G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.1)$$

де P_1 - випромінювана потужність, P_2 - потужність на вході приймальної антени, G_1 , G_2 - коефіцієнти підсилення антен, λ – довжина радіохвилі, d – відстань від джерела до приймача. У формулі (4.1) використано такий відомий параметр, як згасання у «вільному» просторі

$$L_{\text{FSL}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (3.2)$$

проаналізувавши який можна зробити висновок, що зі збільшенням частоти необхідно підвищувати потужність сигналу, а для ММД за прийнятним обмеженням величини потужності (до 1 Вт [10]). А тому радіус використання у вікнах прозорості може бути максимум до декількох сотень метрів. Хоча для сучасних систем зв'язку, включно для ММД, для міської забудови експериментально деякими дослідниками дійсно встановлена залежність [50]

$$\frac{P_1}{P_2} = G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^a, \quad a=2, \dots, 5, \quad (3.3)$$

При виведенні формули (4.1) припускали, що втрати у тракті передачі розраховуються для певної частоти між двома ізотропними антенами. Під ізотропним випромінювачем зазвичай мають на увазі випромінювач, що рівномірно випромінює радіохвилі у всіх напрямках вільного простору, під яким мається на увазі однорідне непоглинаюче середовище ($\varepsilon = 1$), (рис.3.1).

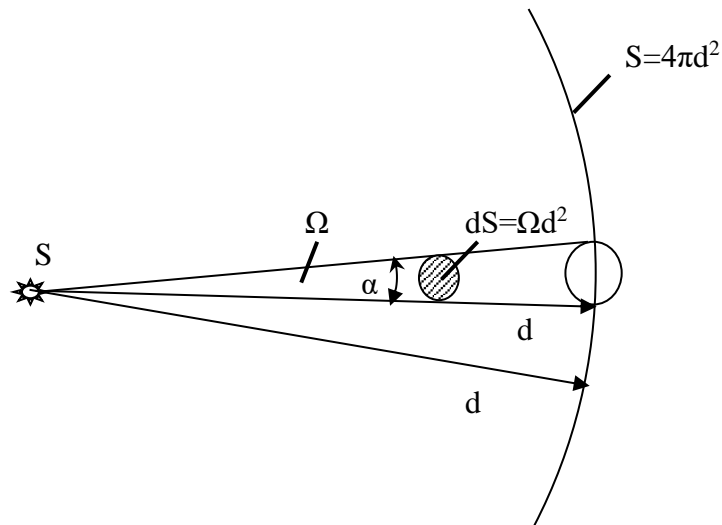


Рис. 3.1. До визначення ізоτροпної на спрямованій випромінюючих антен.

Ω – тілесний кут при вершині прямого конуса з кутом розхилу α ,

dS – площа частини сфери з центром в вершині конічної поверхні, що вирізається тілесним кутом Ω , $\Omega = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right)$, для малих кутів < 1 град

$$\Omega \approx \frac{\pi\alpha^2}{4} .$$

Питома потужність ізоτροпного випромінювача:

$$w = \frac{P_i}{S} = \frac{P_i}{4\pi d^2}, \text{ Вт/м}^2. \quad (3.4)$$

Але ізоτροпних антен не існує. Приймавши, що енергія спрямованого випромінювача потужністю P_1 розподілена в межах тілесного кута Ω рівномірно, то

$$w = \frac{P_1}{dS}, \quad (3.5)$$

де $dS = \Omega d^2 = \pi\alpha^2 d^2$ (см.рис1).

Питома потужність w на відстані d від випромінювача у вільному просторі

$$w = \frac{P_1}{dS} = \frac{P_1}{\Omega d^2} = \frac{4P_1}{\pi\alpha^2 d^2}. \quad (3.6)$$

Потужність P_2 на вході приймальної антени, розташованої на відстані d від випромінюючої антени у вільному просторі

$$P_2 = wdS_{\text{пр}}, \text{ Вт} \quad (3.7)$$

де $dS_{\text{пр}}$ - площа приймальної антени, яку можна вважати ефективною, то $dS_{\text{пр}} = A_2$. Межі кута розходження α для сучасних антен ММД можуть складати долі 1 градуса і навіть при $\alpha = 0,5$ град та $d = 1000$ м $dS \approx 57$ м², таким чином $dS_{\text{пр}} \ll dS$.

У відповідності до закону збереженні енергії з (3.5) - (3.7) отримаємо

$$P_1 = P_2 \frac{\Omega d^2}{A_2}$$

або

$$P_1 = P_2 \frac{\pi \alpha^2 d^2}{4A_2}.$$

(3.8)

Формулу (3.9) можна записати у інших варіантах, через коефіцієнт підсилення передаючої антени $D_1 = \frac{4\pi}{\Omega}$:

$$P_1 = P_2 \frac{\Omega d^2}{A_2} = P_2 \frac{4\pi d^2}{D_1 A_2}, \quad (3.9)$$

або використовуючи коефіцієнт підсилення антенної $G_1 = kD_1$ (k – ККД антени)

$$P_1 = P_2 \frac{4\pi k d^2}{G_1 A_2}. \quad (3.10)$$

У радіотехніці під ефективною площею приймальної антени мається на увазі площа, з якої антена добуває енергію радіохвилі, що до неї надходить. В класичних підручниках з радіотехніки (наприклад, в [10]) вона визначається співвідношенням

$$A_2 = \frac{D_2 \lambda^2}{4\pi}, \text{ м}^2. \quad (3.11).$$

Проте якщо використовувати це співвідношення в (3.10) або (3.11), то отримаємо, що зі зменшенням довжини хвилі енергетичний потенціал радіосистеми буде зростати, що протирічить формулі Фрііса (3.1), де залежність є оберненою. Також необхідно зауважити, що для використовуваних антен ММД у вигляді фазованих антенних ґраток або параболічних антен немає подібного співвідношення (3.12) між розмірами антени та довжиною хвилі. В перспективі фазовані антенні ґратки можуть

мати сотні випромінюючих елементів при малорозмірній апертурі. В деяких розробках розміри приймального елементу можуть досягати міліметрів, наприклад $1,6 \times 1,2$ мм для антени на 135 ГГц.

Отримана формула (3.10) суттєво відрізняється від формули (3.1), в ній відсутня пряма залежність від довжини хвилі випромінювача. Проте відомо, що згасання електромагнітних хвиль в атмосфері залежить від довжини хвилі (частоти). Для міліметрових хвиль ця залежність має складну форму з вікнами прозорості та поглинання, та залежить від погодних умов (3.2).

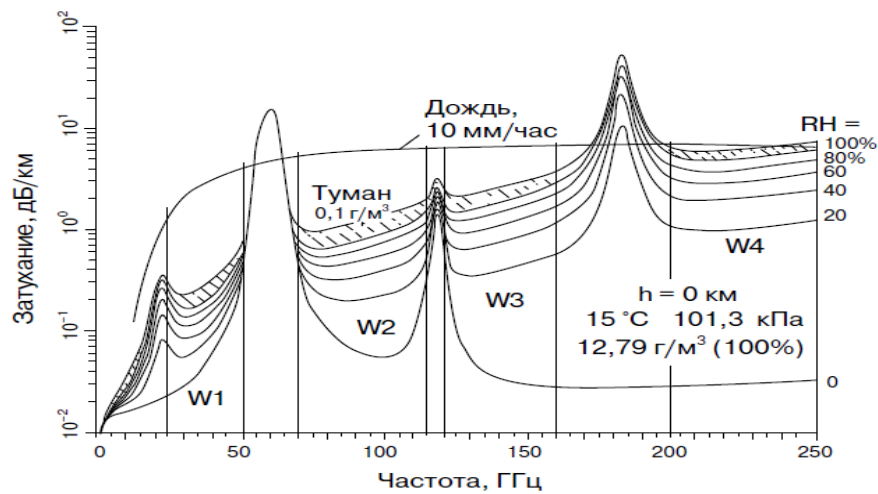


Рис.3.2 Специфічне атмосферне згасання на рівні моря для різних рівнів вологості (RH), з туманом та дощем включно. W1-W4 – вікна прозорості атмосфери.

Множник послаблення в атмосфері, $\alpha_{(дБ/км)}$ - коефіцієнт згасання в атмосфері та гідрометеорах. Для нормальної атмосфери коефіцієнт згасання, наприклад для Е-діапазону відповідає приблизно 0,1 дБ/км.

В класичному підручнику Скляра Б. акцентується, що параметр втрати у вільному просторі (2), має «... чисто геометричний ефект та не акцентується те, що $G_2 = 1$. Мабуть, найкращою назвою було б втрати поширення при одиничному КНД...». Для міліметрових хвиль розмір антен не залежить від довжини хвилі, а для перспективних мобільних систем ММД фазовані антенні

гратки можуть мати сотні випромінюючих елементів при малорозмірній апертурі. Також в наголошується, що енергетичний бюджет каналу зв'язку визначає докладне співвідношення між ресурсами передачі та приймання, джерелами шуму, поглиначами сигналу та результатами процесів, що виконуються в каналах, а також джерелами, що послаблюють сигнал та вносять шум, та виділено 21 основних механізми. Для міліметрового діапазону можна виділити з них найбільш суттєві: міжсимвольна інтерференція, фазовий шум гетеродину, амплітудно-фазове перетворення, модуляційні втрати, ефективність антени, втрата наведення антен, атмосферні завади, власні шуми приймача.

В формулі (3.9) враховуються втрати потужності сигналу тільки за рахунок розходження променя, яка подібна енергетичному розрахунку бюджету для оптичних відкритих систем зв'язку, в яких суттєвим також є згасання в атмосфері та спотворення фазового фронту турбулентністю атмосфери.

Для приблизної оцінки енергетичного бюджету можна вважати P_2 мінімальним значенням виявленого сигналу, $P_{\text{мзс}}$:

$$P_{\text{мзс}} = F k_B T_S B (SNR)_{\text{min}}, \quad (3.12)$$

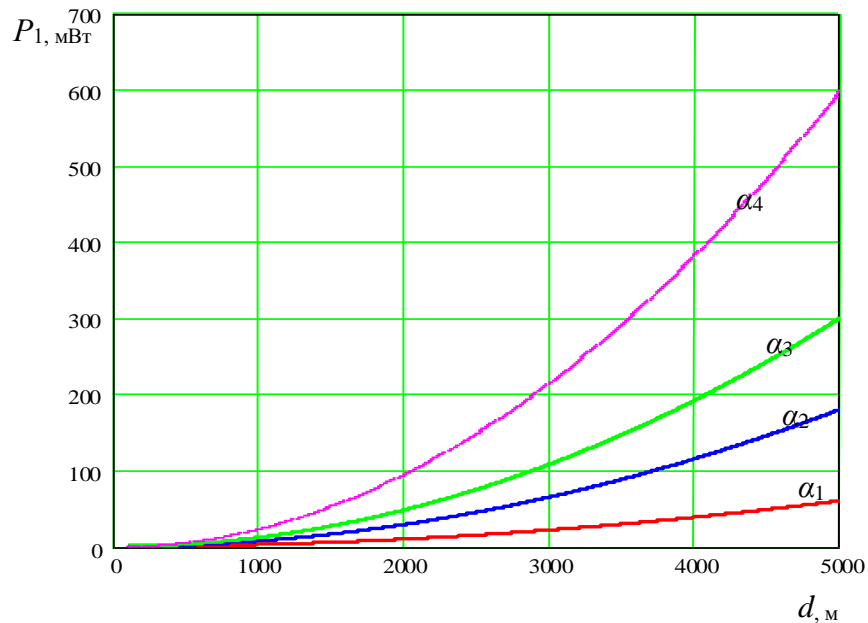
де $(SNR)_{\text{min}}$ - мінімальне значення сигнал/шум (SNR), що необхідне для виявлення сигналу приймачем, F - фактор шуму, визначається як відношення величин вхідного сигналу до шуму до вихідного, взяте для межі за тепловим шумом на вході при T_S , k_B - стала Больцмана, B – смуга частот.

Якщо враховувати тільки втрати в атмосфері, формулу (4.8) можна подати у вигляді

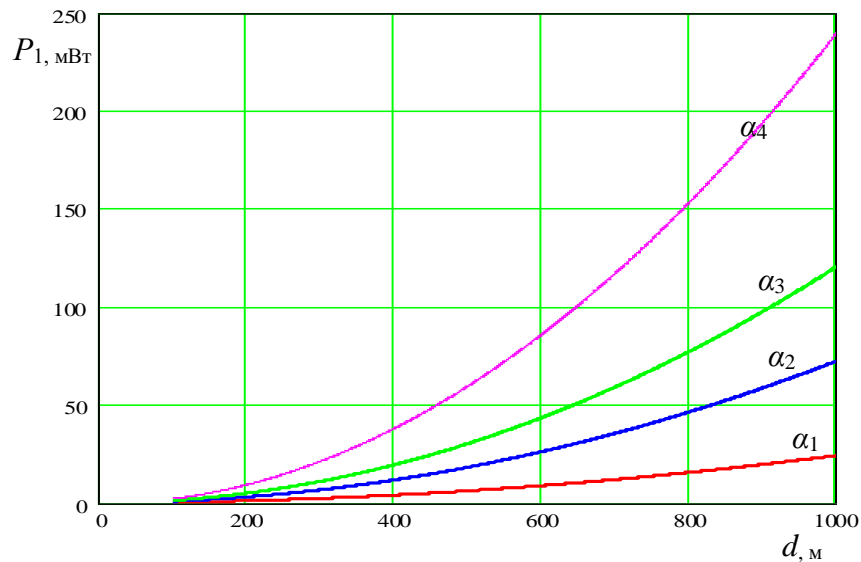
$$P_1 = P_{\text{мзс}} \frac{\pi \alpha^2 d^2}{4 A_2 L_{\text{атм}}}. \quad (3.13)$$

Якщо кут розкриття приймальної антени прийняти рівним 1 градус, площу приймальної антени - 1 см^2 , порядок чутливості приймача 10^{-10} Вт (що

відповідає, наприклад, обладнанню ALFOplus80, де чутливість приймача -68/-74 дБм). Для різних коефіцієнтів згасання в Е-діапазоні (W2) (див. рис.4.2) отримаємо наближені залежності потужності передавача від відстані до приймача, наведені на рис.3.3,а та з запасом бюджету 10 дБ на рис.3.3,б.



а)



б)

Рис.3.3. Залежність потужності передавача від відстані, розрахована за формулою (14) при різних коефіцієнтах згасання: $\alpha_1=10$ дБ/км, $\alpha_2=15$ дБ/км, $\alpha_3=20$ дБ/км, $\alpha_4=25$ дБ/км для Е-діапазону а) без запасу на бюджет, б) з запасом бюджету 10 дБ.

3.2 Оптиелектронні та волоконно-ефірні технології

У ММХ системах зв'язку базовою є технологія МІМО (з безліччю входів і безліччю виходів), яка дозволяє компенсувати великі атмосферні втрати ММХ вузькою діаграмою спрямованості. Фазовані антенні решітки (ФАР) відіграють важливу роль в сучасних радіолокаційних і безпроводових системах зв'язку. ФАР – це системи, що складаються з групи випромінювачів, в яких шляхом зміни амплітуди і фази сигналів забезпечується підсилення випромінювання антени в бажаному напрямку і його пригнічення у всіх інших напрямках. Фазовані антенні решітки для ММХ можуть мати сотні випромінюючих елементів разом із малорозмірною апаратурою. І за такої масштабованості перспективним є застосування фотоніки і гібридного аналого-цифрового створення діаграм спрямованості. Утворення діаграм спрямованості в аналоговій ФАР на основі фотоніки було ідентифіковано як перспективний напрям застосування технології ще в 90-х роках минулого століття [30]. Численні фотонні методи запропоновані для фазового зсуву радіосигналів на основі оптичних ліній затримки або інтегрованих паралельних ММЦ. Для підвищення продуктивності, ефективності покриття, швидкості передачі пропонуються різні моделі гібридного аналогово-цифрового утворення діаграм спрямованості на багато користувачів (розрахованого на одного користувача) просторового мультиплексування для різних рівнів потужності сигналу.

Для фазованих антенних решіток кутова ширина променя дорівнює:

$$\alpha \approx \sqrt{\lambda/Nd}, \quad (3.14)$$

де N – кількість випромінюючих елементів, d – відстань між цими елементами.

Звичайні ФАР реалізують на основі електричних фазообертачів, які мають проблему з неточністю наведення антен, а тому обмежені для вузько-смугових операцій. Однак для багатьох застосувань дуже важливо, щоб антени

фазової матриці могли працювати в широкій смузі частот з формуванням вузьких діаграм спрямованості (від декількох градусів до частин одного градуса). В мобільних системах ММД 5G для кожного користувача планується утворення власної діаграми спрямованості (просторове розділення каналів). Ефективним розв'язанням таких завдань є використання формування діаграми спрямованості в режимі реального часу TTD (англ. True time delay). Модулі TTD певним чином встановлюють фазу радіосигналу, яка варіюється з частотою, в той час як фазообертачі є незалежними від частоти. Найбільшою проблемою в цих компонентах є масштабованість, оскільки кількість антенних елементів в масиві може обчислюватися сотнями. Більшість відомих у даний час методів формування випромінювання вимагають істотних обчислювальних потужностей і тривалого часу обробки. В прикладі, коли радіолокатор створений на базі ФАГ, що складається з 1000 приймальних елементів, які працюють при миттєвій смузі 10 ГГц, вимагається відношення сигнал/шум не менш 90 дБ, для чого необхідним є 15-розрядний процесор. Можна розрахувати, що для стробування на частоті Найквіста потрібно 20×10^9 вибірок в секунду, та кожна вибірка повинна бути подана 15-розрядною цифровою послідовністю. В результаті сукупна швидкість передачі на антенну становить 300 Гбіт/с. Внаслідок того, що це фазована решітка, вихідні сигнали усіх її 1000 елементів повинні бути оброблені когерентно, тобто повна швидкість даних, що потребують обробки, становить 300 Тбіт/с. Така швидкість необхідна для управління та обробки надзвичайно великого обсягу даних, але вона суттєво перевищує сучасні технологічні можливості. Аналогова обробка сигналів, або діаграмоутворення, можливо, будуть необхідні завжди, оскільки системні вимоги по відношенню до збільшення динамічного діапазону, миттєвої смуги пропускання та розмірів решітки можуть зростати з більшою швидкістю, ніж прогрес у цифровій обробці сигналів.

Характерну схему активної фазованої антенної решітки (АФАР) наведено на рис. 3.4. Вона містить модулі, які дискретно перелаштовуються в режимі реального часу (TTD) та РЧ фазообертач.

З формули (3.14) видно, що для формування вузьких діаграм спрямованості необхідно використовувати високочастотне випромінювання ММД. У цьому випадку у виразі (3.14) будуть присутні малі значення довжини хвилі та, відповідно, значення кута розкриття антени також будуть мати малі значення.

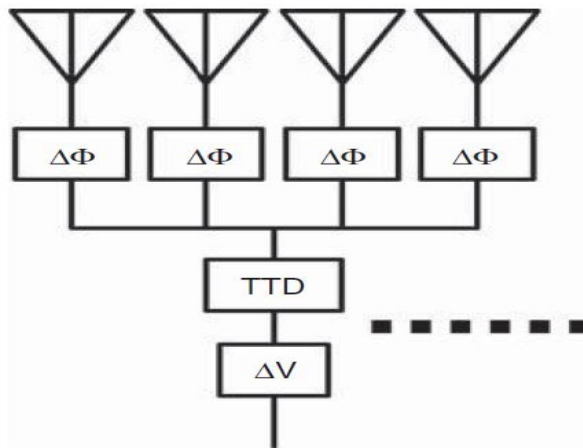


Рис. 3.4. Приклад сегменту АФАР з використанням модулів, які дискретно перелаштовуються у ТТД, фазообертачів ($\Delta\Phi$) та регулювання амплітуди (ΔV)

На рис. 3.5 показано два принципи керування радіопроменем. Як видно з рисунку 2.3,а, щоб направити промінь під кутом θ до нормалі до площі розкриття ФАР потрібен фазовий зсув:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda} = 2\pi \frac{d \sin \alpha}{\lambda} \quad (2.2)$$

Звідси:

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta\varphi \lambda}{2\pi d} \quad (2.3)$$

Кут випромінювання θ залежить від довжини хвилі НВЧ випромінювання. Отже система формування променя з електричними фазообертачами може працювати тільки з використанням вузькосмугових сигналів. Цю проблему можна вирішити, якщо фазовий зсув здійснювати за допомогою лінії затримки, як показано на рис. 3.5,б, де використовується лінія затримки з довжиною $\Delta L = d \sin \theta$. Тоді напрям променя задається формулою:

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta L}{d}. \quad (2.4)$$

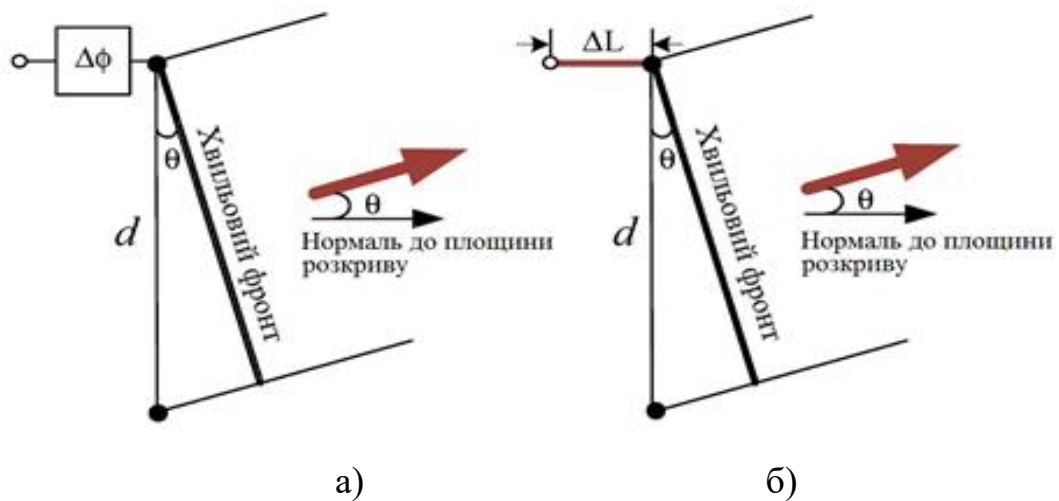


Рис. 3.3. Керування променем а) за допомогою фазообертача, б) з використанням лінії затримки

Він є незалежним від довжини хвилі (частоти) і ширини смуги сигналу. На рис. 3.5 наведено приклад діаграми спрямованості антени з шести елементів, розділених на відстань 1 см, що працюють на центральній частоті 15 ГГц з шириною смуги сигналу 10 ГГц, для звичайних електронних фазообертачів та фазообертачів, що використовують компонент затримки за часом.

Розвиток технології зустрічає серйозні обмеження, що притаманні електричним пристроям. Наприклад, мідні провідники мають високі втрати на високих частотах, що призводить до обмеженої смуги пропускання тракту

Bragg grating). Система, що складається з п'яти каналів ліній затримки FBG, показана на рис. 3.6.

Для формування променів в режимі реального часу використовується масив волоконних бреггівських ґраток. Випромінювання лазера, яке перелаштовується за частотою (TLS), через контролер поляризації (PC) подається на модулятор, що модулюється сигналом радіочастоти. Модульований оптичний сигнал через дільник потрапляє в канали з бреггівськими ґратками.

На рис. 3.7 наведена оптоелектронна система, у якій використано багаточастотний лазер і одна широкосмугова бреггівська ґратка, що перелаштовується. Різні затримки у часі досягаються за рахунок відбиття хвиль в різних місцях бреггівської ґратки, що перелаштовується.

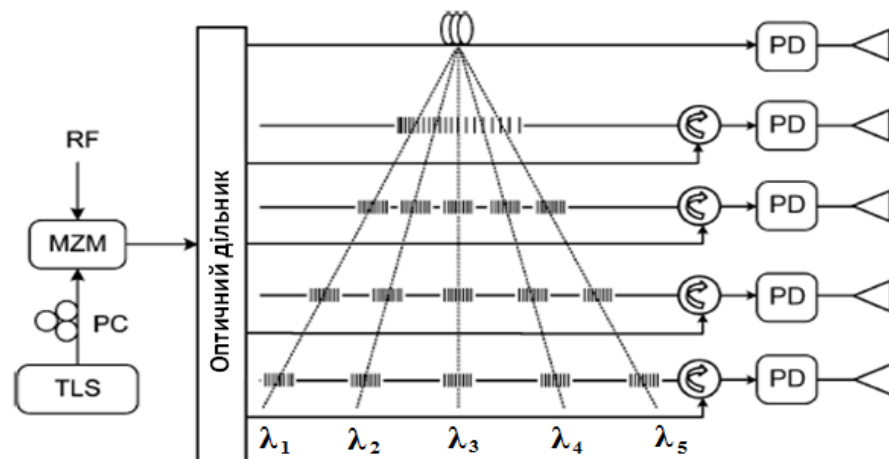


Рис. 3.7. Оптоелектронна система затримки в режимі реального часу

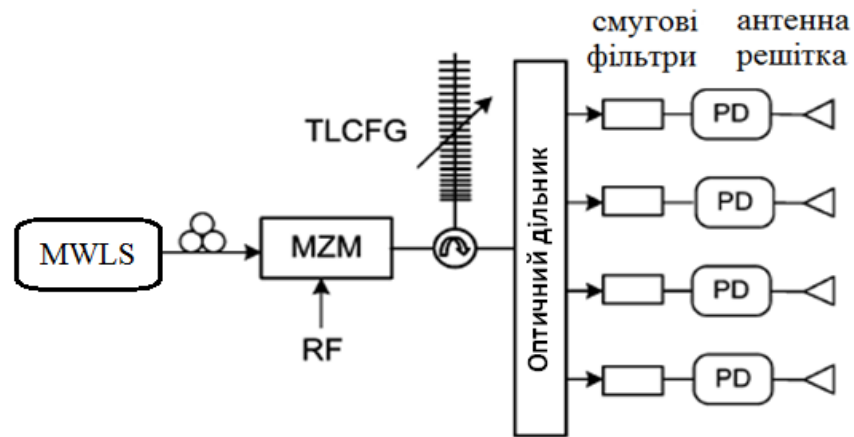


Рис. 3.8. Оптиелектронна система затримки в режимі реального часу для формування променів за допомогою однієї волоконної бреггівської ґратки, що перелаштовується. MWLS – багаточастотний лазер, TLCFG – бреггівська ґратка, що перелаштовується

Хвилі генеруються багаточастотним лазерним джерелом. Архітектури, подані на рис. 3.7 і рис. 3.8, притаманні одновимірному формуванню променю. Однак, запропоновано кілька архітектур, що дозволяють двовимірне формування променю. Це архітектури з фіксованою часовою затримкою та зі змінними часовими затримками, які отримують шляхом використання оптичних призми вільного простору і двовимірних просторових модуляторів світла. Для реалізації широкопasmового I-Q- фазообертача також можна використати інтегровані модулятори MZM або DPMZM. Такий фазообертач забезпечує широку смугу, швидко перелаштовується, дає мінімальні варіації амплітуди радіосигналів і масштабується на велику кількість каналів. Ці характеристики мають першорядне значення для розв'язку оптиелектронних завдань управління фазою сигналу ММХ в пристроях, які утворюють діаграму спрямованості антени.

Загальною характерною рисою волоконно-оптичних пристроїв, що утворюють діаграму спрямованості антени в реальному часі, є робота в спектральних діапазонах С (1530—1565 нм) та/або L (1565—1625 нм) за

класифікацією МСЕ-Т. Основними причинами такого вибору є низькі втрати у кварцовому волокні та широка робоча спектральна смуга, що дозволяє, наприклад, ефективно замінювати набір перемикаючих ліній затримки на базі великої кількості НВЧ-ліній передачі, що зазвичай застосовуються в АФАР, на багатохвильову передачу зі спектральним розділенням каналів по одній загальній волоконно-оптичній лінії.

3.3. Гібридні архітектури мереж для зв'язку у міліметровому діапазоні

Перед телекомунікаційними компаніями постає завдання створення мереж, які були б інтегровані на самих різних рівнях, поєднували різні стандарти і технології, забезпечуючи безшовний перехід з одного стандарту до іншого, від однієї технології до іншої. Такі мережі повинні не просто поєднувати різні стандарти (від GSM до LTE і 5G), але і забезпечувати повну взаємодію між різними мережевими рівнями, а також мережами, побудованими на різних технологіях радіодоступу. Гетерогенна мережа (англ. HetNets) будується з підмереж, які працюють в різних стандартах, за різними технологіями. При цьому всі вони утворюють єдину інтегроване середовище, де забезпечений безшовний непомітний для користувача перехід з однієї підмережі в іншу. Тобто, гетерогенна мережа функціонує, як єдина система.

Гібридна конфігурація Het-Nets з використанням ММД і діапазону LTE (в основному дециметровий діапазон) може значно збільшити пропускну здатність мереж. В даному випадку пропонуються базові станції, оснащені кількома приймально-передавальними антенами, що працюють в різних смугах (рис.3.9).

Було проведено багато досліджень з передачі ММХ 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.

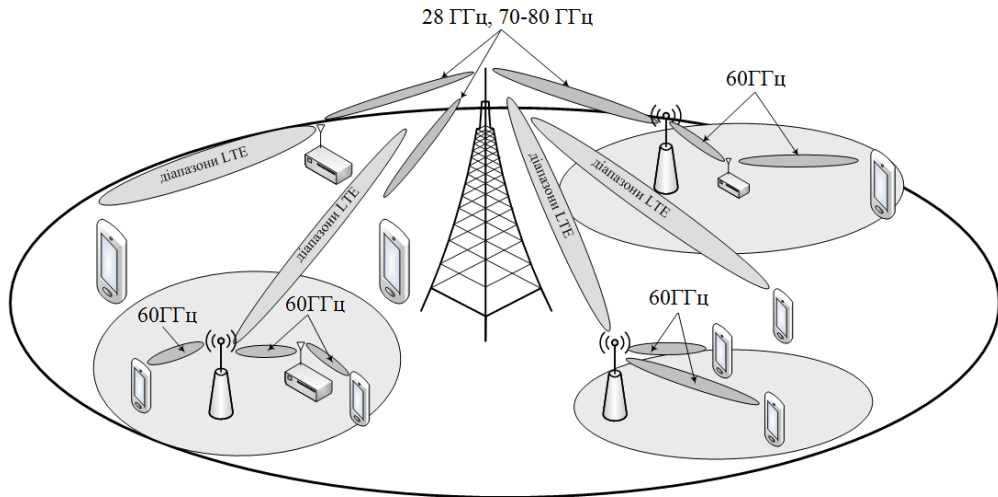


Рис.3.9. Гібридна конфігурація Het-Nets з використанням міліметрового діапазону та діапазону LTE

На рис.3.10 представлена волоконно-ефірна конфігурація мережі із використанням ММД. Центральна станція (ЦС) і розподілені базові станції (БС) пов'язані з оптичними волокнами.

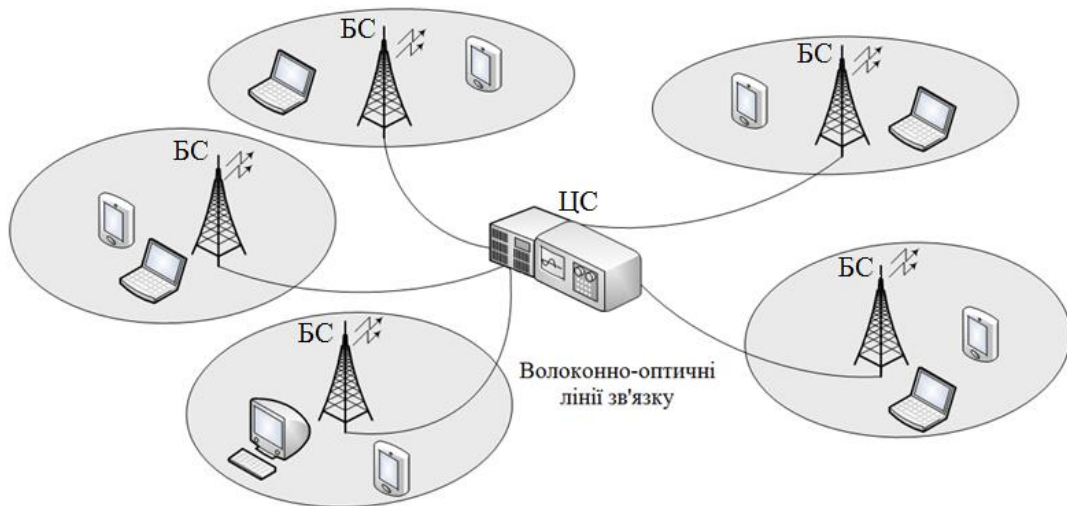


Рис.3.10. Гібридна волоконно-ефірна конфігурація мережі у ММД : базові станції стільників, що працюють в ММД зв'язані через волоконно-оптичні лінії

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 променя в технології МІМО, в якій також задіяні оптоелектронні методи мікрохвильової фотоніки.

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

В табл.3.1 показано для порівняння показників волоконно оптичних систем, мобільних систем LTE, стільникового зв'язку у міліметровому діапазоні хвиль.

Табл.3.1

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

Порівняння продуктивності	Оптоволокно	LTE	Стільниковий зв'язок в ММД	FSO
Ємність	Необмежено	До 3 Гбіт/с	Теоретично до 100 Гбіт/с	До 30 Гбіт/с
Затримка передачі даних	Наднизька затримка	До 3 мс	До 0,01 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	Довжина хвилі 1550 нм
Чинники вартості	Змінна вартість за кілометр Тривалий час розгортання	Теоретична межа в 1 Гбіт/сек від 3,2 км (2600 МГц) до 19,7 км (450 МГц). Фіксована вартість за канал + повторювач	Обмеження розмірів стільників (100-150 м). Межі зовнішнього та внутрішнього (в будівлі) використання	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
Реконфігурованість	Обмежена	Обмежена	Обмежена	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	До 15 км для наземних ліній

Зроблено висновок, що поєднання переваг волоконно-оптичних та радіо- технологій передачі, є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності та мобільності мереж доступу телекомунікаційних систем

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проаналізовано перспективні напрямки розвитку мереж безпроводового зв'язку із застосуванням терагерцового та оптичного діапазонів. В роботі змодельована і оцінена продуктивність наземних радіо та оптичних систем

Показано, що для подальших досліджень пріоритетом може бути:

1. Питання практичного інтегрування систем зв'язку в терагерцовому та оптичному діапазонах, особливо в у вікнах прозорості атмосфери.

2. Використання міліметрового діапазону та терагерцового діапазону радіохвиль (30 до 300 ГГц) ефективно для майбутніх поколінь зв'язку, зокрема, 5G, для високошвидкісної передачі даних більш 1 Гбіт/с.

3. Сучасні досягнення в оптоелектроніці та напівпровідниковій техніці дозволяють створювати пристрої генерації в діапазоні 30-400 ГГц.

4. Можливість впровадження технології 5G як конвергентної системи різних рішень, таких як LTE, інтелектуальні антени, розширення спектру радіодіапазону до міліметрового, бездротові шлюзи з волоконно-оптичними лініями зв'язку, гібридні системи і т.п.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. J. Thompson et al., “5G wireless communication systems: prospects and challenges,” *IEEE Comm. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 62-64, 2014.
2. 5GPPP Architecture Working Group, “View on 5G Architecture,” Dec 2017.
3. M. Gineste et al., “Narrowband IoT Service Provision to 5G User Equipment via a Satellite Component,” in 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Singapore, Singapore, Dec 2017.
4. S. Kota et al., “Satellite component of NGN: Integrated and hybrid networks,” *International J. Satellite Commun. and Netw.*, vol. 29, no. 3, pp. 191-208, 2011.
5. Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, “6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, Sep. 2019.
6. M. Latva-aho and K. Leppanen (editors), “Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence” White Paper, 2019.
7. M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Towards 6G Networks: Use Cases and Technologies,” submitted to the *IEEE Communications Magazine*, 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1903.12216>
8. M. Jia, X. Gu, Q. Guo, W. Xiang, and N. Zhang, “Broadband hybrid satellite-terrestrial communication systems based on cognitive radio toward 5G,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 96–106, Dec 2016.
9. EMEA Satellite Operators Association, “Satellite Communication Services:
An integral part of the 5G Ecosystem,” White Paper, 2017.

10. M. N. Sweeting, "Modern small satellites-changing the economics of space," *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 3, pp. 343–361, Feb 2018.
11. C. Sacchi, K. Bhasin, N. Kadowaki, and F. Vong, "Toward the Space 2.0 Era [Guest Editorial]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 16–17, March 2015.
12. T. S. Rappaport, R. W. Heath Jr, R. C. Daniels, and J. N. Murdock, *Millimeter wave wireless communications*. Pearson Education, 2015.
13. 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*, Feb 2019.
14. 3GPP, "Study on New Radio (NR) to support non terrestrial networks," TR 38.811 (Release 15), 2018.
15. P. Chini, G. Giambene, and S. Kota, "A survey on mobile satellite systems," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 28, no. 1, pp. 29–57, Aug 2009.
16. A. D. Panagopoulos, P.-D. M. Arapoglou, and P. G. Cottis, "Satellite communications at Ku, Ka, and V bands: Propagation impairments and mitigation techniques," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 6, no. 3, pp. 2–14, ThirdQuarter 2004.
17. E. Cianca, T. Rossi, A. Yahalom, Y. Pinhasi, J. Farserotu, and C. Sacchi, "EHF for satellite communications: The new broadband frontier," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 11, pp. 1858–1881, Nov 2011.
18. G. Baldini, S. Karanasios, D. Allen, and F. Vergari, "Survey of wireless communication technologies for public safety," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 619–641, Sep 2013.
19. W. Zhang, T. Wu, H. Ma, and G. Li, "Hybrid GEO and IGSO Satellite Constellation Design with Ground Supporting Constraint for Space Information Networks," in *IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2018.

20. M. De Sanctis, E. Cianca, T. Rossi, C. Sacchi, L. Mucchi, and R. Prasad, “Waveform design solutions for EHF broadband satellite communications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 18–23, Mar 2015.

21. M. A. Vazquez, A. Perez-Neira, D. Christopoulos, S. Chatzinotas, B. Ottersten, P.-D. Arapoglou, A. Ginesi, and G. Tarocco, “Precoding in multibeam satellite communications: Present and future challenges,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 88–95, Dec 2016.

22. ITU-R, “Attenuation by atmospheric gases,” P.676-11, 2016.

23. 3GPP, “Study on new radio access technology Radio interface protocol aspects (Release 14) ,” TR 38.804, 2017.

ДОДАТОК 1