

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації  
Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

**АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

ГЮІК . XXXXXX .001ПЗ  
(позначення документа)

Дослідження і оцінка роботи каналу зв'язку міліметрового діапазону  
(тема)

Виконав:  
студент II курсу, групи РПСкм-18-1  
Базоокій О. М.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність  
172 телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми  
освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма  
Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси  
(повна назва освітньої програми)

Керівник д.т.н. проф. Кафедри РТІКС  
Руженцев М.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри РТІКС \_\_\_\_\_ Цопа О.І.  
(підпис) (прізвище,  
ініціали)

2019 р.

Не містить відомостей заборонених для відкритого публікування.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра радіотехнологій інформаційно комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва)

Освітня програма Радіоелектронні пристрої системи та комплекси

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Базоокому Олександр Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження і оцінка роботи каналу зв'язку міліметрового діапазону

затверджена наказом по університету від 04 листопада 2019 р. № 1729ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 5 грудня 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз роботи каналу зв'язку міліметрового діапазону хвиль у межах забудови. Передбачити можливість збою роботи радіомоста в опадах

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1. Огляд літературних джерел за темою роботи;

2. Аналіз роботи радіомоста міліметрового діапазону

3. Розрахунок загасання радіохвиль в умовах опадів та забудови міліметрового діапазону хвиль

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) комплект слайдів презентації

---



---



---



---



---



---



---



---

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	д.т.н. проф. кафедри РТІКС Руженцев М.В.		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літературних джерел за темою роботи	05.11.2019	
2	Огляд видів впливу на радіомост	15.11.2019	
3	Дослідження особливостей роботи радіомоста мм діапазону хвиль	22.11.2019	
4	Розрахунок готовності роботи каналу зв'язку Міліметрового діапазону	30.11.2019	
5	Оформлення пояснювальної записки та слайдів презентації	05.12.2019	

Дата видачі завдання 04 листопада 2019 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ д.т.н. проф. Руженцев М. В.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Робота містить: сторниць – 96, рисунків – 33, таблиць – 6, посилань на джерела – 24.

МІЛІМЕТРОВИЙ ДІАПАЗОН. АТМОСФЕРНЕ ПОГЛИНАННЯ, ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ, КУМУЛЯТИВНЕ РОЗПОДІЛЕННЯ

Об'єкт дослідження-Поширення радіохвиль ММ ДХ

.

Предмет дослідження - Дослідження і оцінка роботи каналу зв'язку міліметрового діапазону

В атестаційній роботі проведені огляд та аналіз різних методів розрахунку готовності каналу зв'язку міліметрового діапазону та розповсюдження радіохвиль в атмосфері

Побудована кумулятивна функція ослаблення радіохвиль в атмосфері і проведено її аналіз

## ABSTRACT

The work contains: pages - 96, figures - 33, tables – 6, references to sources - 24.

MILLIMETER RANGE. ATMOSPHERIC ABSORPTION, COMMUNICATION LINE, CUMULATIVE DISTRIBUTION

Object of research is the radio wave propagation.

Subject of research - Research and evaluation of the millimeter band communication channel

The evaluation work reviews and analyzes various methods of calculating the readiness of the millimeter band and the propagation of radio waves in the atmosphere.

The cumulative function of attenuation of radio waves in the atmosphere is constructed and its analysis is carried out.

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ММ – МІЛІМЕТРОВИЙ

ДХ – Діапазон хвиль

ITU – International Telecommunication Union

КВП – коефіцієнтом використання поверхні

ДНА – діаграма направленності антени

ДН – діаграма направленности

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
<b>1 ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ .....</b>	<b>8</b>
1.1 Види загасання радіохвиль міліметрового діапазону.....	8
1.1.1. Особливості поширення радіохвиль міліметрового діапазону.....	8
1.2 Оцінка енергетичних характеристик каналу зв'язку.....	12
1.3 Вплив опадів на канали зв'язку міліметрового діапазону .....	20
<b>2 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ГОТОВНОСТІ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ РІЗНИХ ПОГОДНИХ УМОВ.....</b>	<b>26</b>
2.1 Фізичні характеристики атмосфери .....	26
2.2 Характеристики опадів .....	28
2.3 Статистичні дані тривалості і коефіцієнта завмирання, викликаного дощем.....	36
2.4 Сценарії розгортання мережі в умовах міста.....	39
<b>3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРАХУНКІВ .....</b>	<b>62</b>
3.1 Кумулятивний розподіл.....	62
3.2 Умови технічного забезпечення та обмеження .....	65
3.3 Апаратурно-методичне забезпечення і умови спостережень .....	66
3.4 Результати розрахунків.....	68
ВИСНОВКИ.....	80
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	81
ДОДАТОК А.....	84
ДОДАТОК Б.....	93

## ВСТУП

Постановка задачі: 1) Розглянути вплив опадів на канали зв'язку міліметрового діапазону.

2) Побудувати залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі «точка-точка» (Backhaul link) 60 ГГц для трьох кліматичних зон України

3) Розрахувати загасання в атмосфері радіохвиль міліметрового діапазону для частот 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц

Основним завданням магістерської роботи є дослідження і оцінка роботи каналу зв'язку міліметрового діапазону

Розвиток технологій в області мобільних мереж, інтернету і наземно-космічного зв'язку підвищило попит на високу швидкість передачі даних. Тому в області технології передачі даних акцент змістився на більш високочастотні мікрохвильові діапазони, аж до частот 100 ГГц. При-сування цього щодо нового для широкомасштабно використовуваних комунікаційних додатків діапазону дозволяє забезпечити зростання обсягів по-мов і швидкості переданої інформації вище 10 Гбіт / сек при прийнятних рівнях готовності в мережах зв'язку. Вимоги в таких елементах мереж до інте-грального коефіцієнтами готовності досягають 0.01-0.001%. Для робочих частот більше 10 ГГц для виконання цих вимог важлива проблема прогнв-зировання поглинання і розсіяння радіохвиль міліметрового діапазону (ММ ДХ) в дощі і в деяких типах хмар. [1].

Актуальність питань вивчення статистичних параметрів повного вертикального ослаблення радіохвиль ММ діапазону різко зросла в світі в останні роки, зокрема, з огляду на розробки перспективних шалених швидкостях-них та інформаційно ємних мереж наземно-космічної та тропосферного зв'язку п'ятого (5G) і наступного покоління.



# 1 ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

## 1.1 Види загасання радіохвиль міліметрового діапазону

Особливості міліметрових радіохвиль визначають їх широке застосування в системах радіолокації, дистанційного зондування, навігації, зв'язку. Найбільш перспективним у даний момент є використання радіохвиль міліметрового діапазону для створення супершвидкісних бездротових транспортних мереж мобільного трафіку. Такі мережі вже зараз здатні забезпечити швидкість передачі даних до 10 Гбіт / с, використовуючи стандартні методи модуляції без застосування додаткових алгоритмів кодування. До діапазону відносяться частотні смуги 71-76 ГГц і 81-86 ГГц, робота в яких можлива без оформлення окремих рішень для кожного конкретного типу умови, основні технічні характеристики розроблених, вироблених і модернізованих відповідають встановленим технічним характеристикам [2]. Відповідно до класифікації ETSI до діапазону відносять також область частот 92-95 ГГц [3].

### 1.1.1. Особливості поширення радіохвиль міліметрового діапазону

Лінії зв'язку міліметрового діапазону використовують довжини хвиль близько 3 - 4 мм. Характер поширення радіохвиль цього типу визначається впливом тропосферної рефракції. Однак, при проектуванні ліній зв'язку, заснованих на моделі малої відстані при наявності піднятих антен, тип тропосферного рефракції і вплив Землі можна не враховувати. Таким чином, на характер поширення впливають тільки кліматичні (сезонні) умови, а також резонансна і нерезонансна загасання радіохвиль в тропосфері.

#### Вплив сезонних умов

Зовні вплив пори року на умови поширення за рахунок розсіювання в тропосфері проявляється в тому, що на трасах, розташованих в північній півкулі,

рівень сигналу в літні місяці вище, ніж в зимові. У середніх широтах сезонні зміни рівня сигналу досягають значень порядку 10 - 12 дБ [4]. З цієї причини в основу інженерного розрахунку слід покласти графік залежності множника ослаблення від відстані для зимових місяців.

Розрізняють резонансне і нерезонансна загасання радіохвиль в тропосфері. Резонансне загасання обумовлено властивістю молекул поглинати і випромінювати електромагнітне поле власних спектрів поглинання [5]. Поглинання енергії відбувається при збігу частоти електромагнітного поля хвилі, що розповсюджується з одного з дискретних частот внутрішньо молекулярних переходів. Зворотній перехід з більш високого енергетичного рівня на більш низький супроводжується випромінюванням електромагнітного поля на власній резонансній частоті, яке є одним з полів шумів в радіодіапазоні.

Нерезонансне загасання обумовлено тепловими втратами енергії при поширенні електромагнітної хвилі в різних метеорологічних умовах. Під цими умовами маються на увазі сильна злива, туман, сніг, град, хмари і інші метеорологічні явища в нижніх шарах тропосфери. Ослаблення в опадах особливо істотно позначається на частотах понад 10 ГГц.

Поглинання радіохвиль в тропосфері може бути викликано чотирма факторами:

- поглинанням в гідрометеорах;
- молекулярним поглинанням;
- розсіюванням на молекулах і агрегатах молекул, зокрема, в умовах димки;
- поглинанням в тропосфері твердих частинках пилу, диму.

Поглинанням в умовах димки й імлі для систем зв'язку міліметрового діапазону можна знехтувати, тому що розміри частинок пилу істотно менше 4 мм. Однак при розрахунку діаграми спрямованості антен слід враховувати, що осіли на поверхню антени частинки пилу можуть змінити властивості її поверхні і погіршити характеристики антени.

В літературі [4], [5], [6] вказується на дві різні фізичні причини, що викликають поглинання радіохвиль в гідрометеорах: перш за все, кожне краплю можна розглядати як напівпровідник, в якому розповсюджується радіохвиля наводить струми зміщення. Щільність цих струмів значна, оскільки діелектрична проникність води (при температурі 20 ° С) приблизно в 80 разів перевищує діелектричну проникність навколишнього повітря. У той же час щільність струмів зміщення пропорційна частоті, тому значні струми виникають саме на найвищих частотах діапазону міліметрових хвиль. Виникаючі в краплях води втрати енергії призводять до поглинання радіохвиль: загасання зростає також зі збільшенням інтенсивності опадів і розміру крапель (це пов'язано з тим, що розмір краплі стає порівнянний з довжиною хвилі).

Для врахування впливу ослаблення в формулах, які виражають залежність амплітуди напруженості поля від відстані, вводиться експонентний множник

$$|E| = |E_0| \exp(-\delta r) \quad (1.1)$$

де  $|E_0|$  — напруженість поля без урахування поглинання;  $\delta$  — коефіцієнт поглинання радіохвиль в тропосфері на 1 км дороги,  $r$  — відстань, пройдена в поглинаючої області.

Лінійна залежність між коефіцієнтом поглинання і інтенсивністю дощу, вираженої в мм / год, існує для всього діапазону сантиметрових і міліметрових хвиль. Для визначення коефіцієнта поглинання при будь-яких інтенсивностях опадів використовують графік, показаний на рис. 1.1 [4]. У логарифмічному масштабі ця залежність лінійна до частоти 20 ГГц, після чого переходить в область насичення.

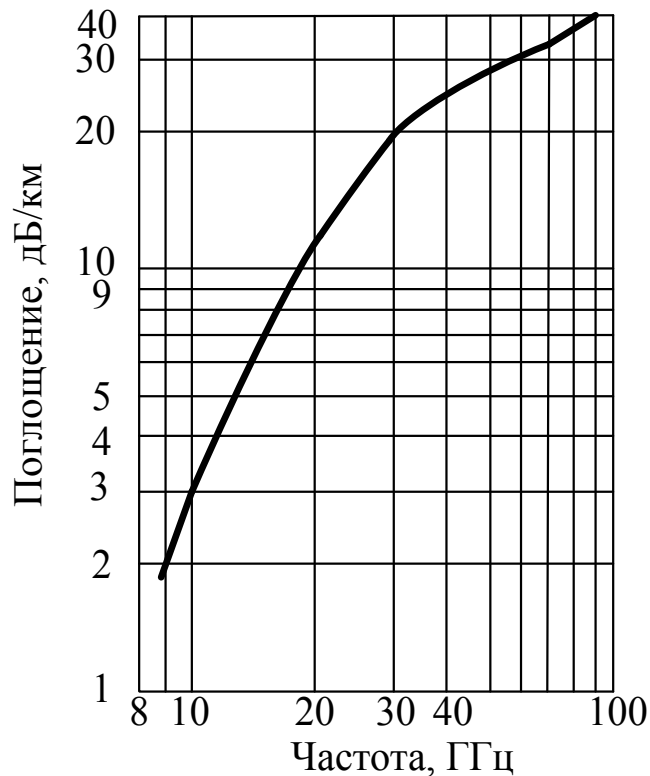


Рисунок 1.1 - Залежність коефіцієнта поглинання в дБ / км від частоти для зливи інтенсивністю 100 мм / год

Значне ослаблення міліметрових хвиль в гідрометеорах призводить до необхідності підвищення енергетичного потенціалу радіолінії. При розрахунках також необхідно враховувати статистичні дані про опади та використовувати районні карти інтенсивності опадів.

#### Явище деполяризації

Наводяться в краплях дощу або туману струми є джерелом розсіяного, або вторинного, випромінювання, що призводить до виникнення ефекту деполяризації [6]. Дощ може значно зменшити розв'язку між ортогонально поляризованими радіохвилями, необхідну для повторного використання частот вище 10 ГГц. Деполяризація в цьому випадку призводить до появи взаємних перешкод між каналами.

#### Молекулярне поглинання

Крім поглинання в гідрометеорах міліметрові хвилі відчувають додаткове поглинання в газах, що входять до складу тропосфери, зокрема, в молекулах водяної пари і кисню. Це пояснюється тим, що при резонансній взаємодії радіохвиль з

молекулами води і кисню на частотах, близьких до частот їх власних коливань, енергія хвилі переходить у внутрішньо-молекулярні енергію, що призводить до селективного поглинання хвиль певної довжини.

Таким чином, коефіцієнт поглинання радіохвиль в тропосфері на 1 км шляху  $\delta$  є суперпозицією двох величин: коефіцієнта поглинання в газах -  $\delta_g(r)$  і коефіцієнта поглинання в гідрометеорах -  $\delta_{gm}(r)$ .

Інтенсивне поглинання відбувається на хвилях 2,5 мм і 5 мм для кисню і на хвилях 1,8 мм і 13,5 мм для водяної пари. У вуглекислому газі, озоне, метані поглинання міліметрових радіохвиль не відбувається.

Також в діапазоні довжин хвиль від 1 мм до 10 мм є чотири «вікна» щодо слабкого поглинання, а саме: в області 1,2 мм ( $\delta = 0,7$  дБ / км), в області 2 мм ( $\delta = 0,3$  дБ / км), в області 3 мм ( $\delta = 0,22$  дБ / км) і в області 8,6 мм з поглинанням 0,07 дБ / км [4].

Таким чином, можна зробити висновок, що найбільш істотний вплив на поширення міліметрових радіохвиль надають поглинання в гідрометеорах (дощі помірної і більшої інтенсивності і в тумані малої водності) та деполяризація радіохвиль, менший вплив надає поглинання в кисні і водяних парах. З цього випливає, що при проектуванні радіолінії прямої видимості необхідно вводити запас по енергетичному потенціалу радіолінії, враховуючи при цьому не тільки статистичні дані щодо кількості опадів в досліджуваному районі, а й девіацію запасу по потужності в залежності від сезону.

## 1.2 Оцінка енергетичних характеристик каналу зв'язку

Далі в дипломі наводиться оцінка енергетичних характеристик каналу зв'язку для розробки аналітичної моделі бездротової транспортної мережі мобільного трафіку на підставі даних про поширення радіохвиль міліметрового діапазону.

Оцінка енергетичного потенціалу бездротових транспортних мереж мобільного трафіку

Оцінка енергетичного потенціалу повинна проводитися для різних комбінацій наступних груп системних параметрів з урахуванням впливу рівня бічних пелюсток антен:

- параметри приймальної і передавальної антен (тому що будь-яка передавальна антена при використанні її в якості приймальної (і навпаки), зберігає свої основні характеристики, вибір режиму роботи антени не є принциповим при моделюванні [8]),

- яку випромінює потужність передавального пристрою і чутливість приймальних пристроїв,

- тип модуляції,

- величина втрат при поширенні.

При побудові радіоліній, що працюють в міліметровому діапазоні довжин хвиль, в даний час використовуються дводзеркальні параболічні антени (антени Кассегрена). Вибір антен цього типу обумовлений меншим затінюванням поверхні дзеркала, і, отже, більш високим коефіцієнтом використання поверхні (КВП).

Таблиця 1.1 - Коефіцієнт посилення і кут розкриття головної пелюстки діаграми спрямованості антени (ДСА) за рівнем половинної потужності

Середні частоти піддіапазонів	$f_1 = 93,5$ ГГц	$f_2 = 83,5$ ГГц	$f_3 = 73,5$ ГГц
Диаметр зеркала			
$d_1 = 0,3$ м	46,7 дБ/0,75°	45,7 дБ/0,84°	44,6 дБ/0,95°
$d_2 = 0,45$ м	50,2 дБ/0,5°	49,2 дБ/0,56°	48,1 дБ/0,63°
$d_3 = 0,6$ м	52,7 дБ/0,37°	51,7 дБ/0,42°	50,6 дБ/0,48°

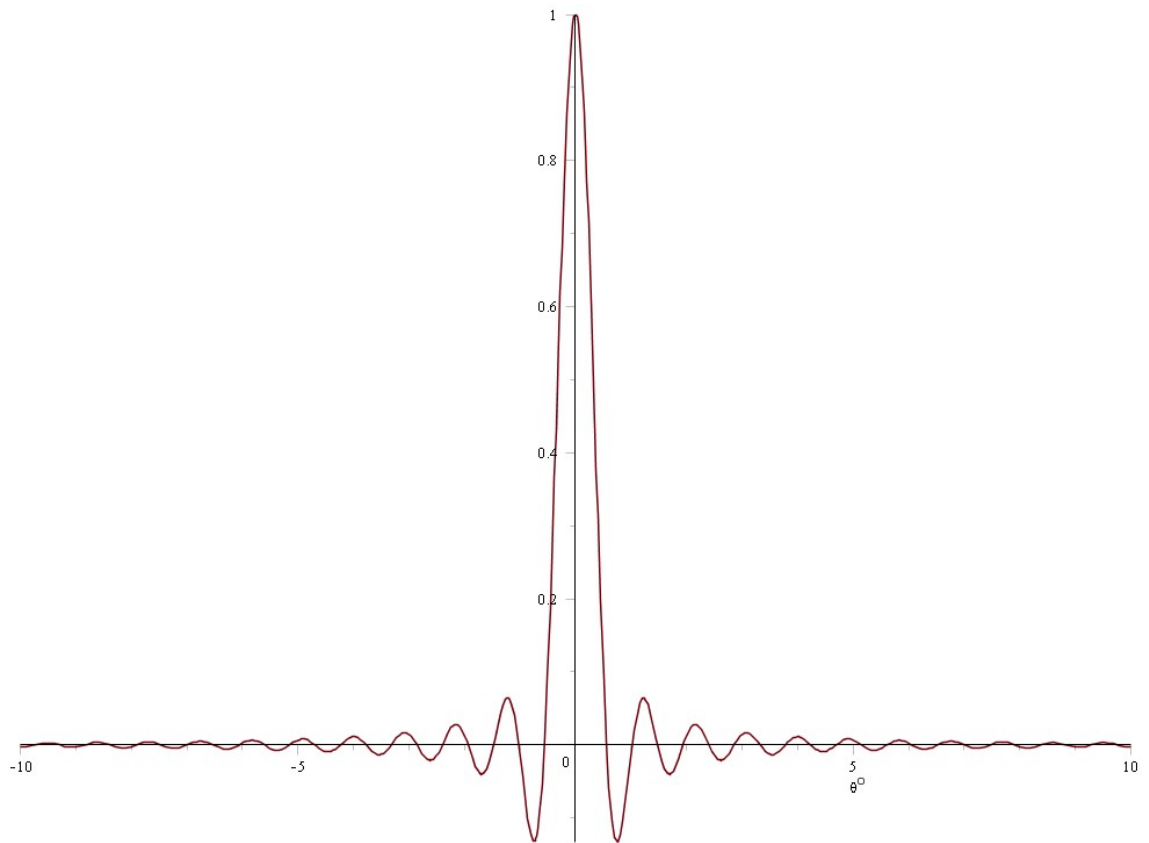


Рисунок. 1.2 - Нормована діаграма спрямованості параболічної антени

На рис. 1.2 представлена діаграма спрямованості антени в діапазоні напрямків випромінювання  $\pm 30^\circ$  (1) з урахуванням потужності випромінювання передавача і основних втрат при поширенні у вільному просторі на відстані 500 м від передавача; на діаграмі також показаний рівень потужності сигналу в перерахунку на ізотропну антену (2). Як видно з графіка, випромінювання в діапазоні кутів  $\pm 10^\circ$  менше рівня ізотропного випромінювання.

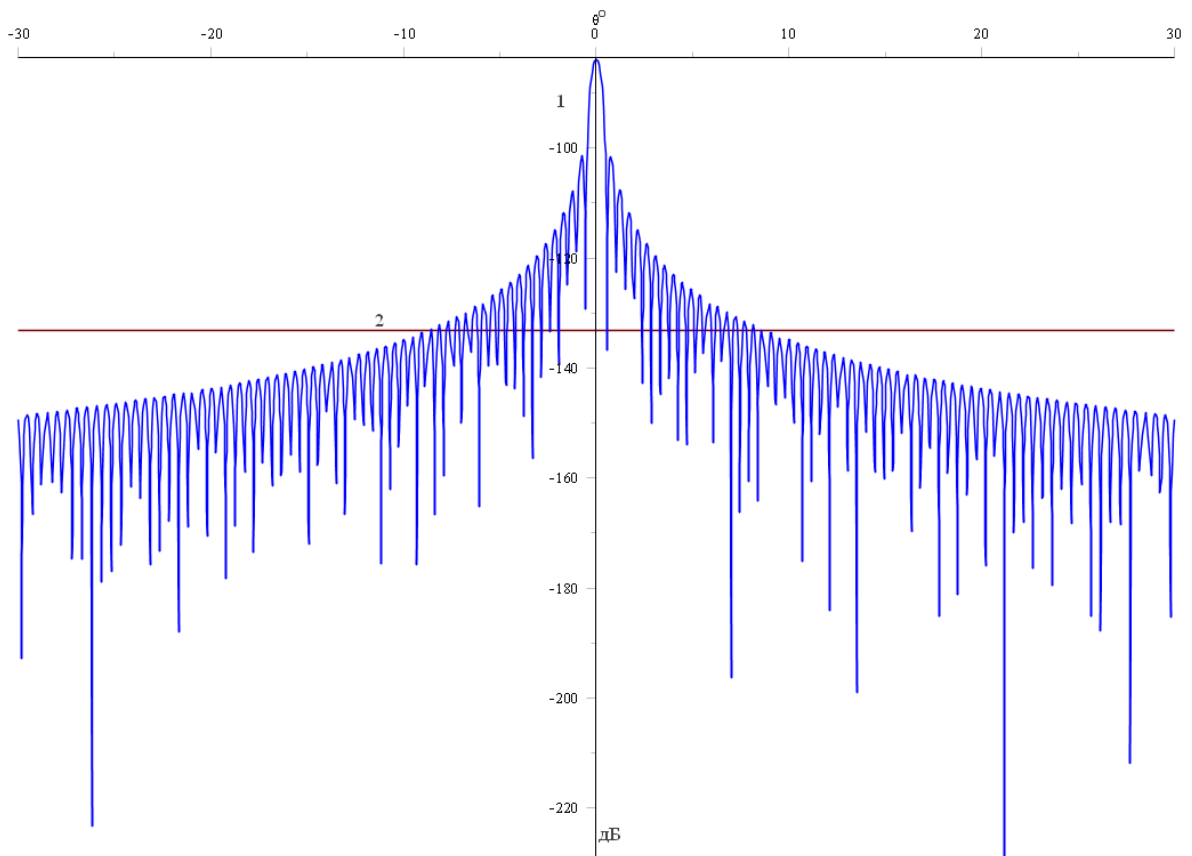


Рисунок. 1.3 - Діаграми спрямованості застосовуваної антени (1) і ізотропної антени (2)

Як відомо [9], [10], [11], перешкодозахищеність лінії зв'язку залежить від використовуваного типу модуляції. На рис. 1.3 видно, як змінюється потужність на виході прийомної антени в залежності від повних втрат при поширенні і відстані. В даному випадку еквівалентна ізотропна випромінювана потужність (ЕІВП) передавача відповідає 40,9 дБ. Також приведена потужність шуму в смузі 4,5 ГГц, що еквівалентно співвідношенню сигнал / шум в 1 дБ. Щодо потужності шуму відкладені рівні потужності для різних типів модуляції сигналу. Співвідношення сигнал / шум для всіх рівнів модуляції відповідає ймовірності помилки на біт (BER)  $10^{-3}$  [12], [13]. Так, наприклад, для QAM256 сигнал / шум складає 19 дБ і максимальна відстань, на якому можливо здійснити прийом, - 4 км. Таким чином, точки перетину рівнів чутливості різних типів модуляції з кривою потужності на виході прийомної антени визначають максимальну відстань при заданій потужності передавача.



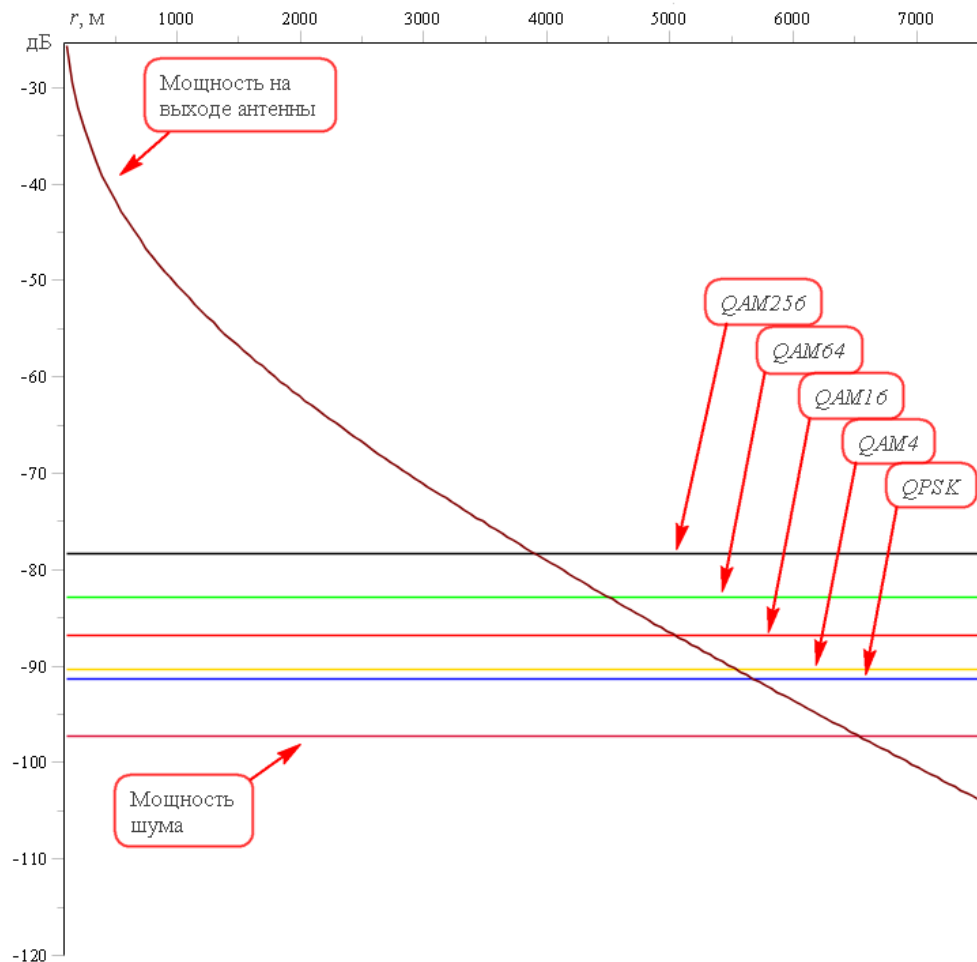


Рисунок. 1.4 - Залежність потужності на виході прийомної антени від відстані і повних втрат (ЕІВП передавача 40,9 дБ) і необхідні рівні потужністю для різних типів модуляції сигналу

Крім того, за даними рис. 1.4 можна оцінити дальність зв'язку при зазначених типах модуляції, наведеної ЕІВП (40,9 дБ) або для будь-якої іншої ЕІВП шляхом зміщення прямих, відповідних типів модуляції і рівня власного шуму приймального пристрою, на потрібну величину.

Так, наприклад, для дальності зв'язку 500 м і типі модуляції QAM256 необхідна ЕІВП передавача буде дорівнює  $ЕІВП - 36,5 = 4,4$  дБ (2,75 Вт), і тоді потужність передавача відповідна 4,4 дБ буде дорівнює  $-44,8$  дБ / Вт ( $3,3 \cdot 10^{-5}$  Вт).

З урахуванням вищесказаного, на рис. 1.5 наведено залежності потужності на виході прийомної антени від відстані для повних втрат, а також без урахування втрат в гідрометеорах (ЕІВП передавача 4,4 дБ) і необхідні рівні потужності для

різних типів модуляції сигналу. Очевидно, що за відсутності гідрометеорів дальність зв'язку збільшується, що відповідає запасу по потужності 3 дБ.

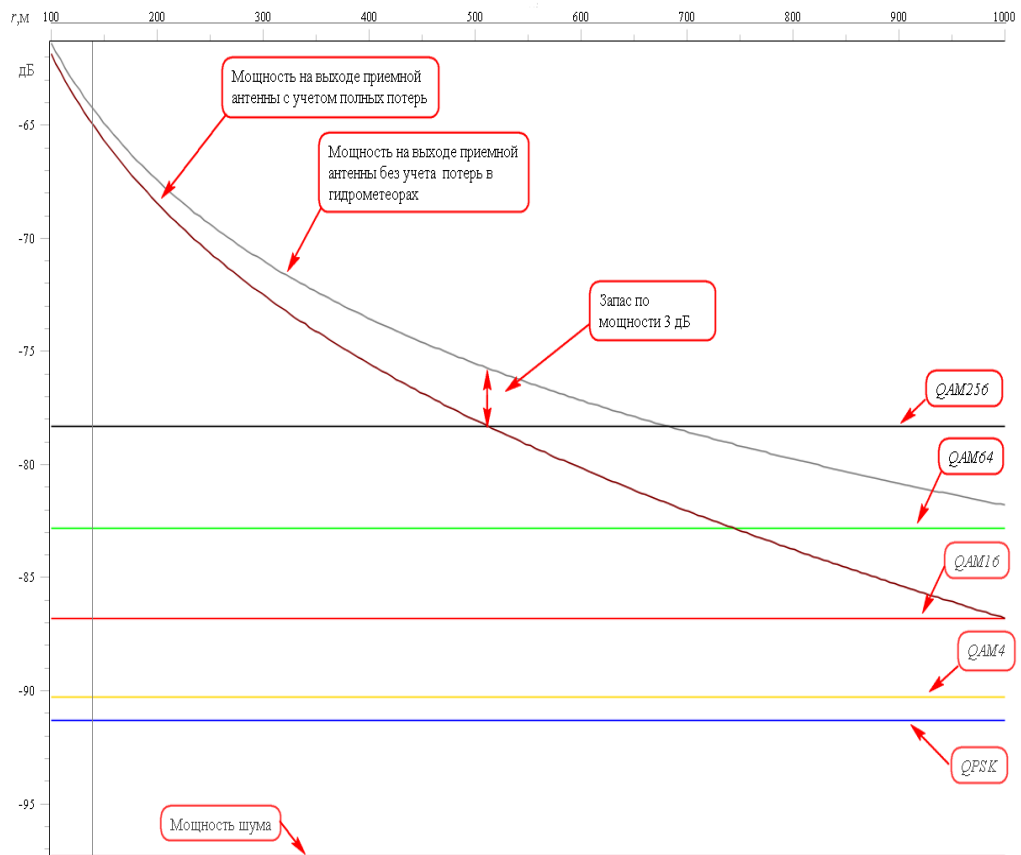


Рисунок 1.5 - Залежність потужності на виході прийомної антени від відстані для повних втрат і без урахування втрат в гідрометеорах (ЕІВП передавача 4,4 дБ) і необхідні рівні потужності для різних типів модуляції сигналу

Оцінка заважає дії випромінювання передавачів по бічних пелюстках діаграми спрямованості антени

#### Перешкоди по бічних пелюстках ДНА

Енергія, яку випромінює передавальними пристроями через бічні пелюстки антени, в деяких випадках створює перешкоди, які потрапляють на вхід знаходяться поблизу приймальних пристроїв. Рівень таких перешкод залежить від ДНА, частот і потужностей передавачів. Також можна сказати, що ДНА і рівень бічних пелюсток залежать від форми антени, від розподілу поля в її розкритті і від середньоквадратичної похибки поверхні використовуваної антени [14]. Коефіцієнт посилення антени з ідеальною параболічної поверхнею можна визначити як  $(J_1(x))$  -

функція Бесселя першого роду, першого порядку). Ширина променя по рівню половинної потужності становить ( $d$  - діаметр антени,  $\lambda$  - довжина хвилі). Можна вважати, що при малих погрішності виготовлення форми параболічної антени, рівні бічних пелюсток зменшуються відповідно до залежності ( $\theta$  - розкривши першого пелюстки діаграми спрямованості антени). Тобто потужність убуває за законом. Як правило, бічні пелюстки зменшуються до тих пір, поки їх огинає не досягне значення, яке на 8-13 дБ нижче потужності ізотропного антени [10].

На рис. 1.6 представлена залежність відстаней від 0 до 500 м в залежності від кута ДНА при роботі передавача, який використовує QAM256 (його ЕІВП = 4,4 дБ / Вт). Також на рисунку наведено рівень потужності для ізотропної антени. При побудові не враховуються додаткові втрати в дощі і гідрометеорах, тому що при відстанях значно менших 500 метрів вони незначні. Так, наприклад, на відстані 70 м (перший пелюстка ДНА на рис. 1.6) втрати складуть 0,38 дБ.

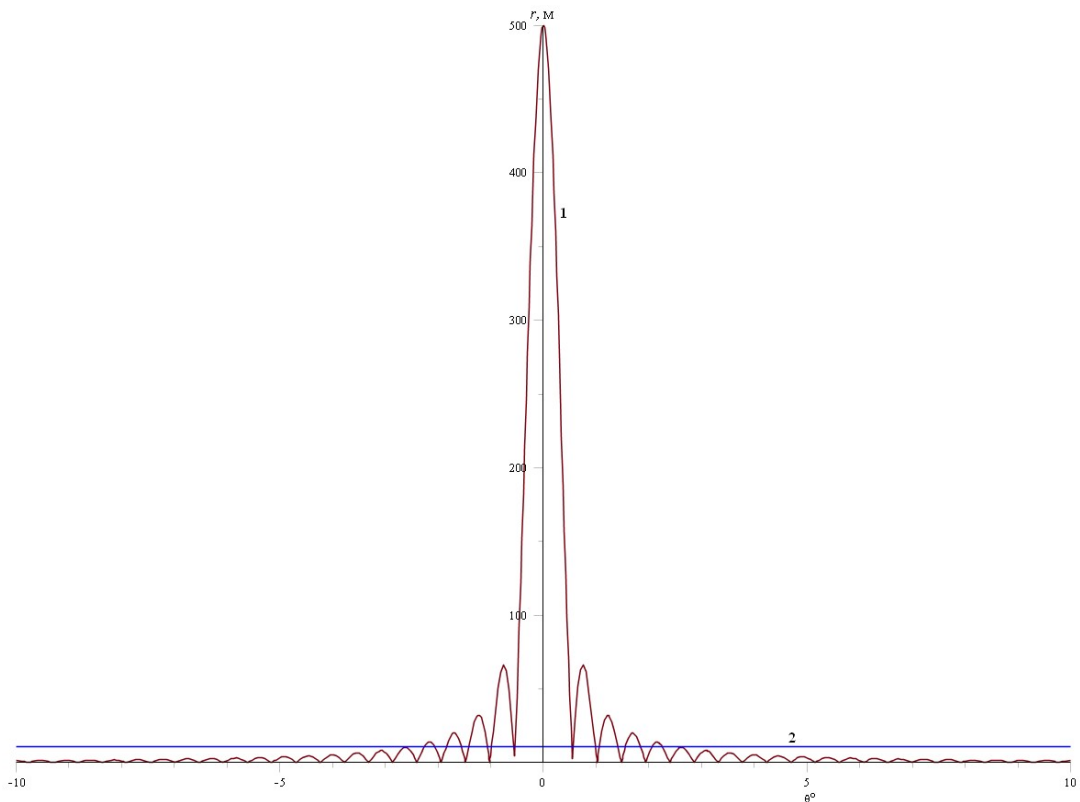


Рисунок 1.6 - Залежність відстаней від кута ДНА при  $P_{\text{прд}} = 3,3 \cdot 10^{-5}$  Вт, чутливості приймачів  $P_{\text{мін}} = 1,6 \cdot 10^{-9}$  Вт, тип модуляції QAM256 для спрямованої антени (1) і відстань для ізотропної антени і порогової чутливості приймача (2)

Ізотропне випромінювання дозволяє оцінити відстань, на якому можливо заважає, передавача на близько розташоване приймальний пристрій.

Розвиток технологій в області мобільних мереж, інтернету і наземно-космічного зв'язку підвищило попит на високу швидкість передачі даних. Тому в області технології передачі даних акцент змістився на більш високочастотні мікрохвильові діапазони, плоть до частот 100ГГц. Застосування цього ще нового для широкомасштабно використовуваних комунікаційних додатків діапазону дозволяє забезпечити зростання обсягів і швидкості переданої інформації вище 10 Гбіт / сек при прийнятних рівнях готовності в мережах зв'язку. Вимоги в таких елементах мереж до інтегральних коефіцієнтів готовності досягають 0.01-0.001%. Для робочих частот більше 10 ГГц для виконання цих вимог важлива проблема прогнозування поглинання і розсіяння радіохвиль міліметрового діапазону (ММ ДХ) в дощі і в деяких типах хмар. [15]. Актуальність питань вивчення статистичних параметрів повного вертикального і погонного приземного ослаблення радіохвиль ММ діапазону різко зросла в світі в останні роки, зокрема, з огляду на розробки перспективних надшвидкісних і інформаційно ємних мереж наземно-космічної та тропосферного зв'язку п'ятого (5G) і наступного покоління.

Перевагою діапазону міліметрових хвиль є малі розміри антен (що дозволяє зменшити габаритні розміри радіосистеми в цілому) і велика абсолютна смуга частот (що забезпечує можливість спільного використання діапазону великим числом радіосистем). Однак, у порівнянні з більш низькочастотними діапазонами, радіохвилі міліметрового діапазону відчувають сильне загасання при поширенні в земній атмосфері. Загасання викликано резонансним поглинанням енергії хвиль в атмосферних газах (переважно, в молекулах води і кисню, см. Врізку; зокрема, сильне поглинання в смузі 57-64 ГГц обумовлено взаємодією з молекулами кисню), а також в гідрометеорах (дощ, туман, сніг та ін.). Внаслідок цього земні радіосистеми міліметрового діапазону характеризуються малою дальністю дії (від десятків кілометрів до кількох сотень метрів) і сильною залежністю від погодних умов.

### 1.3. Вплив опадів на канали зв'язку міліметрового діапазону

На поширення радіохвиль міліметрового діапазону великий вплив здійснюють опади. У таких опадах як сніг, дощ, туман радіохвилі міліметрового діапазону мають дуже велике розсіювання, це призводить до погіршення умов електромагнітної сумісності ліній зв'язку між собою і з іншими радіоелектронними системами.

Актуальність досліджень ослаблення радіохвиль міліметрового діапазону в опадах, в світі і особливо в Україні пов'язана з тим що у нас бракує такої інформації. Ці відомості важливі для розвитку наземно-космічних систем зв'язку, в тому числі для впровадження нового покоління телекомунікаційних технологій 5G формату в різних регіонах України.

У різних країнах, різних районах свій мікроклімат. Тому до кожного регіону застосовується індивідуальний підхід до поширення радіохвиль міліметрового діапазону. Для стабільної роботи в міліметровому діапазоні необхідні свіжі дані про інтенсивність опадів. Так як через зміни клімату дані отриманий 10-15 років тому вже не актуальні.

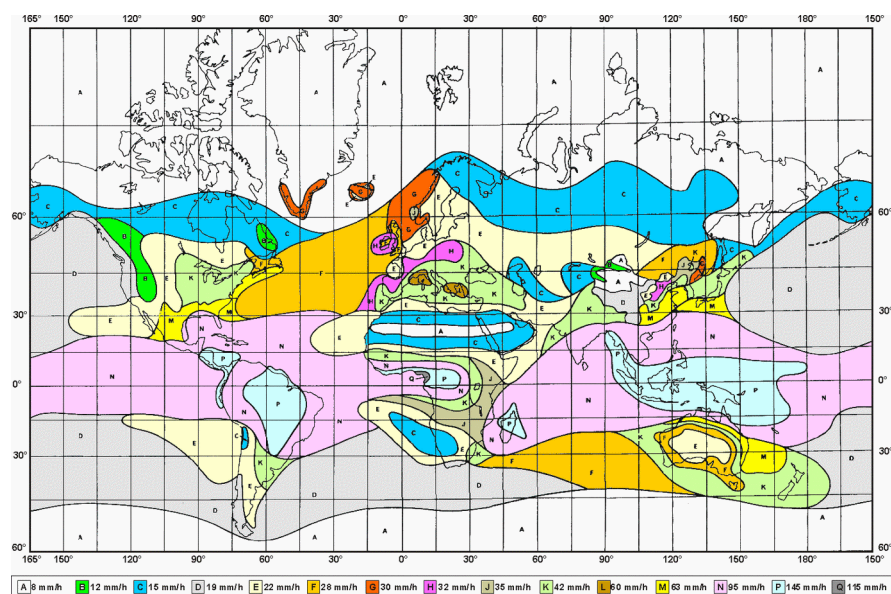


Рисунок 1.7 - Карта дощових зон

При плануванні мережі або окремого прольоту для розрахунку коефіцієнта доступності ліній зв'язку необхідно враховувати кліматичну зону, в якій доведеться працювати. Сильний розкид максимальної довжини прольоту всередині дощового регіону залежить від технічних характеристик вже конкретної апаратури. Отже важливим моментом, для планування, мережі є вибір обладнання. Особливу увагу слід приділити, звичайно, загальній енергетиці системи.

При побудові ліній зв'язку міліметрового діапазону необхідно приділити увагу питанням обліку неоднорідності дощу на трасі поширення, що особливо важливо при розрахунку ліній зв'язку Земля-Космос. Навіть при слабких дощах створюване ними ослаблення досить велике.

Ослаблення радіохвиль міліметрового діапазону в тумані залежить від кількості рідкої води в одиниці його обсягу, а так само від його температури.

Так само ускладнює розробку теоретичних моделей різноманіття форм випадає снігу і сильна залежність поглинання радіохвиль міліметрового діапазону від вологості снігу.

Із усього приведеного вище ми бачимо що на міліметровий діапазон радіохвиль впливає дуже багато різних факторів. І для кожного з цих факторів потрібен свій підхід для рішення проблеми. Всі опади дуже сильно впливають на дальність розповсюдження міліметрового діапазону. Тому для покращення систем зв'язку базові станції потрібно встановлювати на близькій відстані одна від одної. Також це дасть більш ефективне використання виділеного радіочастотного спектру.

Не маючи свіжих даних про опади, ми не можемо розрахувати точні показники готовності ліній зв'язку міліметрового діапазону. Це направлення в науці дуже перспективне у всьому світі тому що перейшовши до мереж 5G ми зможемо передавати великі кількості інформації з дуже великою швидкістю.

Міліметрові хвилі - частотний діапазон радіохвиль з довжиною хвилі у вільному просторі від 1 до 10 мм, що відповідає радіочастот від 30 до 300 ГГц. Міліметрові хвилі дозволяють передавати цифрові дані з дуже високою швидкістю. У міліметровому діапазоні вона може досягати 10 Гб / с і більше. Перевагою

діапазону є велика абсолютна смуга частот. Але якщо їх порівнювати з більш низькочастотними діапазонами, радіохвилі міліметрового діапазону мають сильне загасання при поширенні в земній атмосфері. Через це земні радіосистеми міліметрового діапазону характеризуються малою дальністю дії.

У сучасному світі міліметровим хвилям знаходять все більше нових областей застосування. З областей застосування обладнання міліметрового діапазону можна відзначити концентратори бездротових базових станцій, РЛС ближньої дії і сканери в аеропортах. В радіоастрономії міліметровий діапазон використовується для дистанційного зондування землі. Міжнародний союз електрозв'язку використовує частоти 57 - 59,3 ГГц для моніторингу атмосфери для метеорологічних додатків і для спостереження за кліматом. Локальний максимум ослаблення доводиться на частоту 60 ГГц. Устаткування діапазону 60 ГГц можливо використовувати тільки на відносно невеликих відстанях (не більше 1-1.5 км). Висока киснева поглинання на цих частотах з одного боку є недоліком, значно обмежує дальність зв'язку. З іншого боку даний ефект забезпечує високу електромагнітну сумісність і можливість використання на одній території великої кількості РЕЗ з повторним використанням частот.

У наш час для збільшення протяжності ліній зв'язку становлять інтерес «вікна прозорості» атмосфера на частотах 35, 94, 140, 220 ГГц, в яких спостерігається мінімальне загасання в порівнянні з сусідніми ділянками міліметрових хвиль. На середніх широтах при помірній вологості і температури повітря в ясну погоду влітку у земної поверхні повне ослаблення не велике і при вертикальному поширенні через атмосферу на частоті 94 ГГц не перевищує 1,3 дБ. У вікнах прозорості атмосфери на приземних лініях зв'язку міліметрові хвилі найбільше ослаблення відчують в опадах. Викликано це двома причинами: по-перше, тим, що характерні розміри крапель того ж порядку, що і довжина хвилі випромінювання, через що дифракційне розсіювання краплями носить резонансний характер; по-друге, тим, що великі значення уявної частини комплексного показника заломлення води, обумовлюють високий рівень поглинання енергії хвилі в обсязі краплі.

Вплив розсіювання міліметрових хвиль в опадах на роботу приземних ліній зв'язку може бути вкрай несприятливим, оскільки воно призводить до погіршення умов електромагнітної сумісності ліній зв'язку між собою і з іншими радіоелектронними системами, зменшує скритність передачі інформації, створює електромагнітні перешкоди різними службам, порушує екологію навколишнього середовища. Очікувані дальність і коефіцієнт доступності лінії розраховуються на підставі типових даних про інтенсивність опадів для конкретного регіону (карти / таблиці дощових зон). Для кожного регіону, міста і т.д., модулюються різні канали зв'язку в залежності від ландшафту, щільності будівель, дерев та інших можливих перешкод. Це допомагає здійснити максимально сприятливі умови для передачі інформації і дальності відстані, а так-же мінімальні втрати і загасання міліметрового діапазону хвиль.

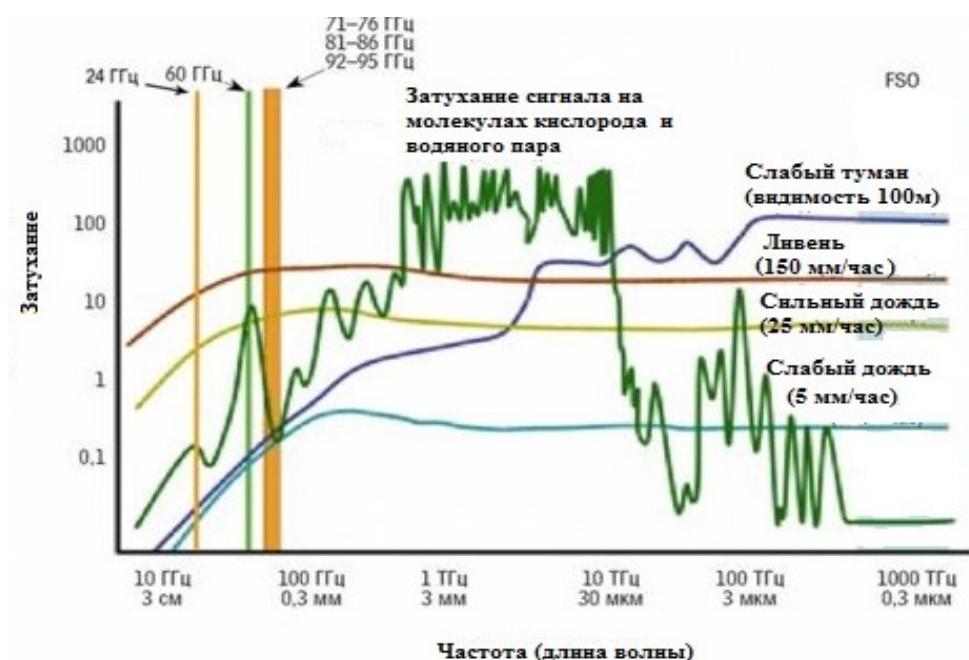


Рисунок 1.8 - Загасання сигналу в навколишньому середовищі

Використання обладнання міліметрового діапазону можливо тільки на трасах з прямою оптичною видимістю. У системах «точка-точка» використовуються гостронаправлені антени з високим коефіцієнтом посилення, поширення радіохвиль



при цьому подібно лазерному променю. При плануванні необхідно враховувати всі можливі перешкоди як на лінії між антенами приймачів, так і в першій зоні Френеля. Пил, туман, дим і інші дрібнодисперсні суспензії з розміром частинок значно менше 3 мм не перешкоджають поширенню хвиль міліметрового діапазону. Основною проблемою для радіотрасс міліметрового діапазону є інтенсивні атмосферні опади. Найбільше загасання вносять зважені частинки, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі. Основними недоліками міліметрового діапазону є: залежність від погодних умов, необхідність точної юстирування антен.

Міліметровий діапазон дуже перспективний в розвитку 5G-мереж, які нині дуже активно розробляються більшістю країн і Україна не виняток. Однією з перспективних технологій реалізації 5G-мереж є малі базові станції. Малі базові станції - це портативні аналоги нормальних базових станцій мобільного зв'язку. У міському середовищі такі станції повинні розташовуватися на відстані 250 метрів один від одного. Варто врахувати, що для покриття в місті можуть знадобитися тисячі таких станцій, які формують єдину «релейний» мережу для передачі даних користувачеві, що знаходиться в будь-якому місці. Антени цих станцій, що працюють в міліметровому діапазоні, матимуть малі габаритні розміри, що дозволить без праці розміщувати станції на стінах будівель і на елементах конструкцій інших споруд.

Так само до переваг малих базових станцій можна віднести більш ефективне використання виділеного радіочастотного спектру. Через невелику області покриття кожної станції одна і та ж частота може бути використана для обслуговування різних клієнтів двома розташованими неподалік базовими станціями. Але у такої архітектури є і недолік, велика кількість потрібних малих базових станцій зробить економічно недоцільним розгортання 5G-мереж в малонаселених сільських районах.

Клімат в Харкові, з точки зору розглянутої проблеми характеризується тим, що з липня по серпень триває посушливий період, під час якого зволоження відбувається переважно грозами. Пік опадів припадає на грозовий червень і липень (по 61 мм). У липні опади зазвичай бувають кілька разів, але ці грозові дощі мають зливовий характер і відрізняються величезною силою. Ця обставина може бути

найбільш деструктивним чинником, що порушує працездатність проєктованих тропосферних і наземно-космічних ліній зв'язку.

Найважливішим параметром, що визначає надійність лінії зв'язку, є параметр готовності (неготовності) лінії зв'язку, який кількісно характеризує ймовірність порушення зв'язку [2]. Розрахувати значення параметра готовності / неготовності лінії зв'язку можна, використовуючи рекомендації міжнародного союзу з телекомунікацій ІТУ. В основі прогнозування значень коефіцієнта готовності, крім конкретизації поставлених апаратурних параметрів лінії зв'язку (чутливість приймача, яку випромінює потужність передавача, коефіцієнт посилення антени і ін.) В ММ ДХ вкрай важливі дані про кумулятивної функції розподілу атмосферного ослаблення для кожного розглянутого регіону. Адже, ослаблення, викликане дощем і потужної купчасто хмарністю, є основною причиною перебоїв в роботі систем тропосферного та супутникового зв'язку, що використовують СМ і ММ діапазони хвиль (ДХ).

Кумулятивний розподіл погонного ослаблення в дощах (дБ \ км) показує ймовірність перевищення того чи іншого значення атмосферного ослаблення.

1) Експериментально, шляхом набору довготривалої статистики безперервної зміни горизонтального погонного атмосферного ослаблення на приземних поінт-то-поінт трасах.

2) Розрахунковим шляхом, на основі експериментальних даних про тимчасовий розподіл дощу з застосуванням радіофізичних моделей адекватно пов'язують інтенсивність дощу з величиною погонного ослаблення в тому чи іншому діапазоні хвиль.

Знання статистичних параметрів ослаблення сигналу на похилих трасах через опади та купчастих типів хмарності необхідно при визначенні надійності і продуктивності супутникових ліній зв'язку.

В данному розділі ми розглянули види загасання радіохвиль з яких можна зробити висновки як різні опади впливають на роботу радіомосту. Та зробили оцінку енергетичних характеристик каналу зв'язку.

## 2 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ГОТОВНОСТІ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ РІЗНИХ ПОГОДНИХ УМОВ

### 2.1 Фізичні характеристики атмосфери

Для тропосфери характерно рівномірне зниження температури з збільшенням висоти, при цьому середній градієнт становить від -5 до -6 К на кілометр. Саме тут бере початок більшість метеорологічних явищ, зокрема утворюються хмари. Висота верхньої межі тропосфери коливається від 8 км на полюсах до 18 км на екваторі і залежить від географічної широти, пори року і метеорологічних умов. В області, розташованій безпосередньо над тропосферою, званої тропопаузою, температура коливається від 190 К на екваторі до 220 К на полюсах. У більшості випадків тропопауза є верхньою межею хмар. Компоненти атмосфери змінюються в залежності від висоти, наприклад гази зі збільшенням висоти стають більш легкими і розрідженими. Компоненти, як правило, діляться на три категорії: компоненти з постійною щільністю (основні компоненти), компоненти зі змінною щільністю (Другорядні компоненти) і аерозолі. До висоти 15-20 км основні компоненти атмосфери розподілені квазірівномірно. Найбільш важливими з цих компонентів є: азот ( $N_2$ ), що становить 78,095% загального обсягу; кисень ( $O_2$ ), що становить 20,93% загального обсягу; аргон ( $Ar$ ), що становить 0,93% загального обсягу; і двоокис вуглецю ( $CO_2$ ), яка становить 0,03% загального обсягу. До другорядних компонентів атмосфери відносяться водяна пара ( $H_2O$ ), неон ( $Ne$ ), гелій ( $He$ ), криптон ( $Kr$ ), метан ( $CH_4$ ) і водень ( $H_2$ ). Концентрація другорядних компонентів залежить від географічного розташування, умов навколишнього середовища (континентальна або морська) і погодних умов. Водяна пара є головним компонентом, і його концентрація змінюється в залежності від географічного розташування та місцевих кліматичних умов. Аерозолі являють собою дрібні зважені частинки і володіють дуже низькою швидкістю падіння. Їх розмір, як

правило, становить від 10-2 до 100 мкм. Аерозолі можуть бути рідкими або твердими. Прикладами можуть служити мікроскопічні частинки пилу або кристали солі в умовах морського середовища. У нижченаведених розділах розглядається мінливість щільності водяної пари і кисню в приземному шарі, зміна щільності водяної пари в залежності від висоти, характеристики випадання опадів (розподіл крапель за розміром, форма і орієнтація гідрометеорів, кінцева швидкість, температура крапель), статистичні характеристики точкової інтенсивності опадів (або інтенсивність дощу), горизонтальна структура дощу, характеристики туману або хмар, а також характеристики піщаних і пилових бур.

Мінливість щільності водяної пари і кисню в приземному шарі

Щільність водяної пари характеризується високою мінливістю. У першому наближенні можна вважати, що флуктуація параметра  $\rho$  в часі підкоряється нормальному закону розподілу з стандартним відхиленням, рівним приблизно четвертої частини середнього значення.

Статистичне відхилення щільності водяної пари залежить від температури атмосфери. Відносна вологість рідко досягає 100%, тобто максимальна щільність водяних парів не перевищує величини, що відповідає насиченню при атмосферній температурі. Щільність водяної пари зростає до величини, близької до насичення, в хмарах і дощовому потоці. На частотах, що перевищують приблизно 15 ГГц, при оцінці статистичних характеристик процесу ослаблення радіохвиль або розрахунку атмосферних перешкод необхідно враховувати, що між ослабленням за рахунок водяної пари і ослабленням в дощі існує кореляція.

Як правило, дощ виникає в таку пору року, коли найвищі середні значення щільності водяної пари спостерігаються у поверхні Землі, і збільшення інтенсивності дощу зазвичай знаходиться в кореляційній залежності від збільшення сезонної щільності водяної пари. Статистичний аналіз даних про абсолютної вологості для 62 пунктів у Сполученому Королівстві показує, що значення щільності водяної пари, що перевищують протягом 0,1 і 99,9% часу, рівні приблизно 15 г / м<sup>3</sup> і 2,2 г / м<sup>3</sup> відповідно, причому ці значення приблизно на 10% більше на півдні і на 10% менше на північному сході Шотландії

## 2.2. Характеристики опадів

Типи опадів: Стратифіковані опади - Стратифіковані опади характеризуються наявністю великих зон з малою інтенсивністю дощу і невеликими краплинками зливових ділянок зі швидкістю випадання до 25 мм / год. цей тип опадів стратифікована в горизонтальному напрямку, причому висота шару дощу досягає смуги яскравості, висота шару снігу - близько 7 км, а шару кристалів льоду - близько 9 км.

Конвективні опади - Конвективні опади характеризуються локалізованими областями порівняно інтенсивних опадів, для яких характерні сильні висхідні і низхідні потоки, що проходять через глибокі шари тропосфери. Ці області мають колоноподібну форму і іноді тягнуться до Тропопауза. Можуть виникати дуже інтенсивні опади тривалістю до десятків хвилин і протяжністю в декілька кілометрів.

Мусонні опади - Мусонні опади характеризуються чергуванням смуг інтенсивних конвективних і стратифікованих опадів. Смуги дуже сильного дощу зазвичай мають ширину до 50 км, а в довжину простягаються на сотні кілометрів і можуть тривати кілька годин.

Тропічні шторми - Тропічні шторми - це великі сформувалися області опадів, що тягнуться на сотні кілометрів. Для шторму характерна наявність декількох спіралеподібних смуг, які закінчуються в зонах інтенсивних опадів, які оточують центральну частину або очей шторму. Ці смуги включають в себе зони інтенсивних конвективних опадів.

Наземні радіолінії складають важливу частину інфраструктури електрозв'язку в більшості країн світу. Правильне визначення основних характеристик, пов'язаних з впливом поширення радіохвиль, має вирішальне значення для ефективності роботи мережі і якості підтримуваних послуг, а також суттєвої економічної вигоди найбільш ефективного використання електромагнітного спектра.

Ослаблення в атмосферних газах - Деяке ослаблення за рахунок поглинання в кисні і водяних парах присутній завжди, і має враховуватися при розрахунку загальних втрат при поширенні радіохвиль на частотах вище приблизно 10 ГГц. Ослаблення на трасі довжиною  $d$  (км) визначається за формулою:

$$A_a = \gamma_a d \text{ дБ} \quad (2.1)$$

Основа методу прогнозування ослаблення в дощі

Процедура прогнозування ослаблення, була отримана з аналізу одночасного вимірювання інтенсивності дощу і поширення, отриманих головним чином в Європі, з деякими додатковими даними з Японії і Сполучених Штатів Америки. Вона використовує концепцію ефективної довжини траси, враховуючи параметри нерівномірності інтенсивності дощу вздовж дійсної траси. Метод заснований на обчисленні ослаблення, перевищує протягом 0,01% часу ( $A_{0,01}$ ), від інтенсивності дощу, перевищує протягом того ж відсотка часу ( $R_{0,01}$ ). Для даного значення  $R_{0,01}$  обчислюється питомий ослаблення, яке для отримання відповідного значення  $A_{0,01}$  множиться на ефективну довжину траси:

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot d \cdot \frac{1}{1 + d/d_0}, \quad (2.2)$$

$\gamma_R$  : удільне ослаблення,

$d$  : довжина траси,

$d_0$  : еквівалентна довжина дощової ячейки.

Емпіричні рівняння використовуються для масштабування на інший відсоток часу ( $p$ ), для забезпечення повного розподілу ослаблення. Ці рівняння виведені на основі експериментальних даних. Для ліній радіозв'язку, розташованих на широтах, рівних або більше  $30^\circ$  (с. Ш. або ю. Ш.):

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)}. \quad (2.3)$$

Для ліній радіозв'язку, розташованих на широтах менш 30 ° (с. Ш. Або ю. Ш.):

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,07 p^{-(0,855 + 0,139 \log_{10} p)} \quad (2.4)$$

Обидва рівняння були виведені для відсотка часу від 1% до 0,001% і їх використання повинно бути обмежена цими межами. Концепція рівній ймовірності не узгоджується з метеорологічними даними, і вона не цілком задовільна з теоретичної точки зору.

Крім того, так як метод використовує тільки одну точку розподілу інтенсивності дощу, він дає в результаті однакове розподіл ослаблення для двох місць з різними розподілами інтенсивності дощу, але з однаковим значенням  $R_{0,01}$ . Однак було відзначено, що розподілу ослаблення має тенденцію бути більш подібними один з одним, ніж розподілу інтенсивності

дощу. У будь-якому випадку, точність, одержувана в методі передбачення для наземних ліній зв'язку, узгоджується з якістю і мінливістю доступних даних про інтенсивність дощу.

Удільне ослаблення  $\gamma_R$  (дБ / км) на даній частоті може бути отримано з інтенсивності дощу, впливає з відомого комплексного показника заломлення води при температурі дощових крапель, кінцевою швидкості і області розподілу дощових крапель. Внаслідок несферичної форми крапель дощу горизонтально поляризовані хвилі схильні до ослаблення більшою мірою, ніж вертикально поляризовані хвилі. У деяких кліматичних областях різниця в ослабленні може досягати значень до 35%. Удільне ослаблення для вертикальної і горизонтальної поляризації, для частот до 100 ГГц, може бути отримано з розширених розрахунків, які враховують несферичну форму крапель дощу.

Для практичного застосування ставлення між удільним ослабленням  $\gamma_R$  (дБ / км) і інтенсивністю дощу курсу  $R$  (мм / год), можна апроксимувати статичним законом.

$$\gamma_R = k R^\alpha.$$

Беручи припущення сферичних крапель, значення  $k$  і  $\alpha$  були розраховані для ряду частот в діапазоні від 1 до 1000 ГГц для декількох температур крапель і розподілів розмірів крапель.

Ефективна довжина траси

Ефективною довжиною траси в наземних лініях зв'язку є довжина гіпотетичної траси, отриманої з даних поширення радіохвиль шляхом ділення загального ослаблення, перевищує в 0,01% часу, на питомий ослаблення, яке перевищується протягом того ж відсотка часу.

Коефіцієнт ослаблення траси визначається як:

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0}. \quad (2.6)$$

Дане рівняння отримано на основі двох припущень:

- просторову структуру дощу можна змодельювати еквівалентними дощовими осередками з прямокутним поперечним перерізом еквівалентної довжини  $d_0$  в площині

траси;

- дощові осередки з прямокутним поперечним перерізом можуть займати будь-яке положення щодо траси з однаковою ймовірністю.

Ефективна довжина траси  $d_{eff} = d r$  відповідає середньої протяжності перетину наземної траси і довжини випадково розташованої еквівалентної дощової осередку  $d_0$ , перевищує в 0,01% часу.

Довжина  $d_0$  еквівалентної дощової осередку спочатку передбачалася постійною, але потім модель була поліпшена залежністю від інтенсивності дощу.

(2.7)

$$d_0 = 35 e^{-0,015 R_{0,01}}.$$

Для  $R_{0,01} > 100$  мм / год замість  $R_{0,01}$  використовується величина 100 мм / год.



Хоча це рівняння засноване на даних похилих трас з ослабленням в дощі, воно було успішно перевірено результатами вимірювань ослаблення в дощі на наземних лініях зв'язку.

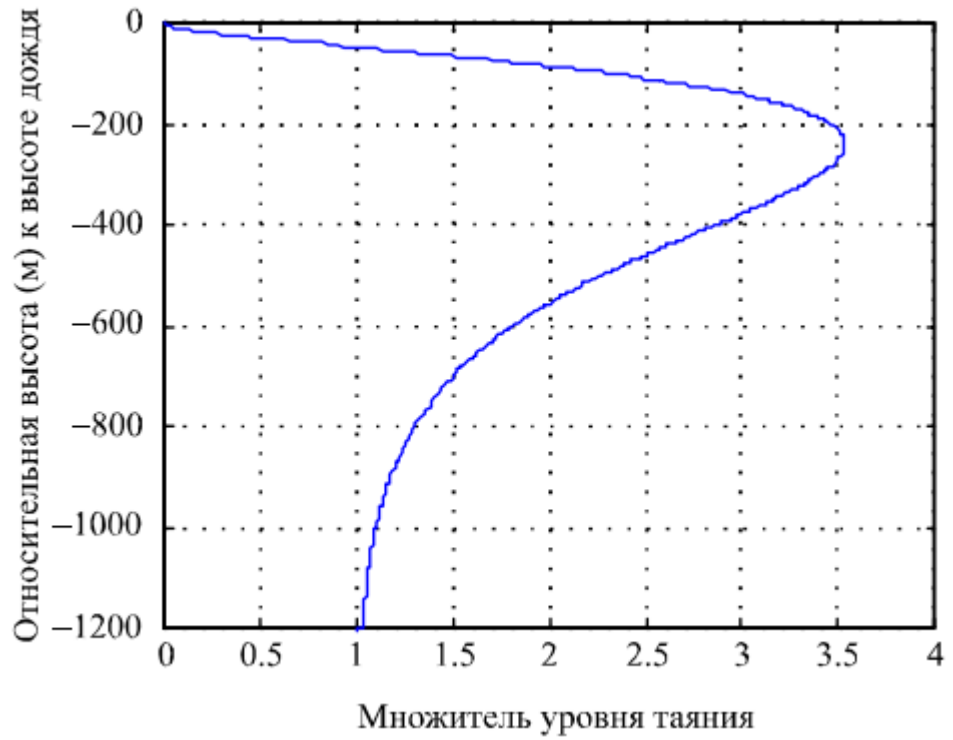
#### Прогнозування поєднання дощу і мокрого снігу

Цей метод використовує глобальну карту висоти дощу і непрямую інформацію для оцінки кількості мокрого снігу, і середнього ослаблення профілю для отримання перевищення ослаблення на рівні танення. Крім того, він враховує певні розподілу висоти опадів або ізотерми нульового градуса, а також те, що перевищення ослаблення фіксованою форми рівня танення є функцією від положення цього рівня. За допомогою таких даних можна прогнозувати ослаблення розподілу на будь-якої лінії зв'язку посилення, беручи до уваги, як дощ, так і мокрий сніг.

Рівень танення складається з суміші льоду, води і повітря. Падаючі крижані гідрометеори тануть, зливаються, а потім розділяються на окремі краплі дощу. Випадання опадів у вигляді мокрого снігу може статися на трасі поширення радіохвиль, коли температура повітря становить близько  $0^{\circ}\text{C}$ . Теорія ослаблення в дощі добре зрозуміла і змодельована для використовуваних діапазонів частот.

Теоретичні коефіцієнти ослаблення встановлені для різних розмірів і форм частинок, а конкретні спрощені моделі встановили залежність ослаблення від частоти і поляризації, а також кута траси по відношенню до головної осі великих несферичних крапель дощу. Навпаки, частки мокрого снігу викликають значно серйозніші труднощі при моделюванні, але певні спроби зроблені. Теоретичний аналіз поширення радіохвиль через рівень танення використовує моделі плавящихся частинок льоду. Знайдено, що частинки мокрого снігу мають більший коефіцієнт ослаблення, ніж краплі дощу при однаковій кількості води, що викликає перевищення питомої ослаблення в порівнянні з дощем під час проведення останнього аналізу. У радіолокації використовується термін "яскрава смуга" через спостережуваного сильного радіолокаційного луни від цього рівня. На додаток до ослаблення основної поляризації, анізотропний характер частинок мокрого снігу також може привести до деякої деполяризації.

а) Множник для оцінки додаткового ослаблення  
на рівні танення в порівнянні з дощем



б) Изотерма при нуле градусов

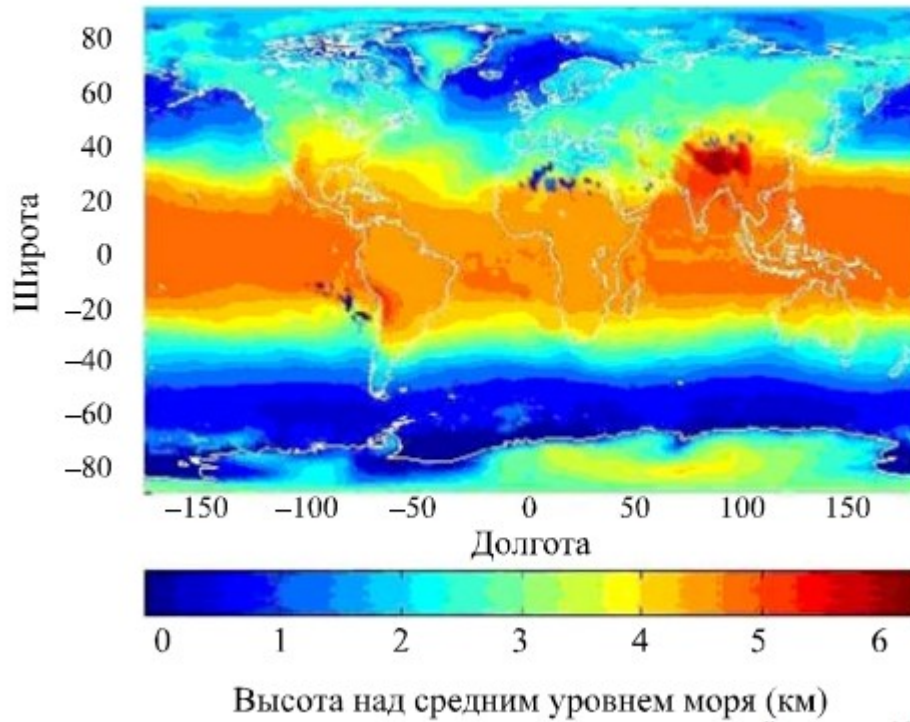


Рисунок. 2.1 - Множник рівня таяння

Метод прогнозування для комбінованого дощу і мокрого снігу, представлений в даному дипломі, використовує спрощену апроксимацію. Множник вводиться для опису того, відрізняється погонне ослаблення від ослаблення в дощі. Множник дорівнює 1 для дощу, і більше 1 для мокрого снігу, його максимум трохи перевищує 3,5 він дорівнює 0 для сухого льоду або снігу.

Множник представлений як функція від вертикального положення рівня танення щодо верхньої межі дощу.

Множник описується  $\Gamma(h)$ :

$$\Gamma(h) = \begin{cases} 0 & 0 < h \\ \frac{a(1 - e^{h/b})^2}{\left(1 + \left(1 - e^{-(h/c)^2}\right)^2 \left(a(1 - e^{h/b})^2 - 1\right)\right)} & h \leq 0, \end{cases} \quad (2.8)$$

де константи  $a = 4$ ,  $b = 70$ , і  $c = 600$ . У грубому наближенні значення цих трьох коефіцієнтів впливають на максимальне значення множника, його положення щодо верхньої частини і глибини рівня, відповідно. Ця функція асимптотично наближається до 1 для великих негативних значень  $h$ , зокрема вона дорівнює 1 для  $h < -1\ 400$  при зазначених  $a$ ,  $b$ , і  $c$ .

На практиці множник, використовуваний для прогнозування, є інтегралом коефіцієнтів множення, зважених з функцією щільності ймовірності відносної висоти рівня танення вздовж траси. Множник встановлений по відношенню до висоти ізотерми при нулі градусів.

Метод передбачення для комбінації дощу, мокрого снігу та сухого снігу простий і використовує такі припущення:

- Рівень опадів відомий, наприклад, з карт в Рекомендації МСЕ-R P.837;
- Оподи підрозділяються на дощ, мокрий сніг та сухий сніг або лід використовуючи висоту, як показано на карті в Рекомендації МСЕ-R P.839, і модель рівня танення;
- Розподіл ослаблення при поєднанні дощу і снігу таке ж, як розподіл для одного дощу.

Ключовий момент методу полягає у визначенні множника з урахуванням вкладу мокрого і сухого снігу. Якщо спостерігаються всі опади, цей множник дорівнюватиме 1, і не буде ніяких змін по порівняно з результатами застосування використовуваної сьогодні процедури (див. Рекомендацію МСЕ-R P.530). Однак, якщо всі спостережувані опади присутні у вигляді сухого снігу або льоду, то множник дорівнює 0, і ослаблення оцінити неможливо. Цілком очевидно, що це відрізняється від існуючого методу. В реальних випадках, оскільки протягом року висота нуля градусів коливається, велика частина опадів буде випадати у вигляді дощу, з невеликою кількістю мокрого і сухого снігу. Ослаблення в мокрому снігу може бути значно більше, ніж в дощі. Таким чином, з огляду на всі можливості, ймовірно коефіцієнт буде більше 1, так що повинен бути дозволений деякий додатковий запас для мокрого снігу.

У процедурі повинні бути встановлені і використані дві функції: середня висота дощу, отримана з висоти ізотерми для нуля градусів, і її зміна або розподіл. Дані по висоті дощу наводяться в Рекомендації МСЕ-R P.839. Передбачається, що висота дощу розподілена по нормальному закону при середньому нульовому значенні зі стандартною девіацій 800 м. В даний час приймається, один і той же розподіл для всього світу.

#### Масштабування для однієї частоти

Якщо доступні тільки дані про ослаблення, виміряні на одній частоті, то може застосовуватися емпірична формула з Рекомендації МСЕ-R P.530, в якій коефіцієнт ослаблення наводиться як функція частоти і ослаблення, для частотного масштабування на тій же трасі в діапазоні частот від 7 до 50 ГГц (і умовно до 100 ГГц):

де:

$$A_2 = A_1 (\Phi_2 / \Phi_1)^{1 - H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)}, \quad (2.9)$$

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2},$$

$$H(\Phi_1, \Phi_1, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55}.$$

Тут  $A_1$  і  $A_2$  - рівноімовірні значення перевищення ослаблення в дощі на частотах  $f_1$  та  $f_2$  (ГГц), відповідно.

Поляризаційне масштабування

Якщо доступні тільки дані про ослаблення, виміряні для однієї поляризації (вертикальної або горизонтальної), то для поляризаційного масштабування рівно можливих значень ослаблення в дощі в межах діапазону довжини траси і частоти методу передбачення ослаблення можуть застосовуватися рівнянні 2.10 з Рекомендації МСЕ-R P.530. Поляризаційне масштабування має застосовуватися тільки до результатів вимірювань або обчислень ослаблення через дощ. Слід додати додаткове ослаблення через поглинання в газах. Вирази, наведені в Рекомендації МСЕ-R P.530, є загальним угодою з результатами експериментів і з припущеннями, що використовують певні коефіцієнти ослаблення з Рекомендації МСЕ-R P.838:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{дБ} \quad (2.10)$$

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{дБ.}$$

Ці вирази вважаються справедливими для методів передбачення ослаблення в дощі в деякому діапазоні значень довжини траси і частоти. Однак слід зауважити, що результати обчислення коефіцієнтів поляризаційного масштабування, що використовують радіолокаційні дані, припускають, що вони будуть використані для звичайного, а не для шаруватого дощу. Це може викликати деяку кліматичну залежність.

### 2.3. Статистичні дані тривалості і коефіцієнта завмирання, викликаного дощем

Процедури визначення статистичних даних тривалості завмирань, викликаних дощем, можна знайти в Рекомендації МСЕ-R P.530. Хоча поки що є мало інформації по загальному розподілу тривалості завмирань, існують деякі дані і емпіричні моделі для певних статистичних даних, наприклад, середній тривалості події ослаблення і деяких таких випадків. Видима різниця між усередненими і середніми значеннями вказує, однак, на асиметрію загального розподілу тривалості. Також існує вагомий доказ того, що тривалість випадків завмирання в умовах дощу набагато більше, ніж в умовах багатопроменевого поширення. Подія ослаблення визначається тут як перевищення рівня ослаблення  $A$  протягом заданого періоду часу (наприклад, 10 з або більше). Співвідношення між числом подій ослаблення  $N(A)$ , середньою тривалістю  $D_m(A)$  таких подій і загальним часом  $T(A)$ , протягом якого рівень ослаблення  $A$  перевищується довше деякої заданої тривалості визначається як:

$$N(A) = T(A) / D_m(A). \quad (2.11)$$

Загальний час  $T(A)$  залежить від визначення події. Дана подія, зазвичай представляє інтерес для використання в статистиці. Тим паче, події меншою тривалості, наприклад, використовуваний в експерименті інтервал вибірки тривалістю в 1 с, також представляють інтерес для визначення відсотка загального часу простою, обумовленого неготовністю, тобто загального часу подій, які тривають 10 с або більше.

Число подій завмирань, що перевищують рівень ослаблення  $A$  протягом 10 с або більше, може бути представлено так:

$$N_{10s}(A) = a A^b, \quad (2.12)$$

де  $a$  і  $b$  - коефіцієнти, які, ймовірно, залежать від частоти, довжини траси і інших змінних факторів, наприклад, клімату.

На основі одного набору вимірювань для траси довжиною 15 км на частоті 18 ГГц на Скандинавському півострові, значення  $a$  і  $b$ , які оцінюються для однорічного періоду, рівні:

$$a = 5,7 \times 10^5 \quad b = -3,4. \quad (2.13)$$

Після того як з рівняння було отримано значення  $N_{10}$ , середня тривалість події замираний, що становить 10 с або більше, може бути обчислена за допомогою інвертирования рівняння.

Грунтуючись на зазначеному наборі вимірювань, виконаних на Скандинавському півострові для траси довжиною 15 км на частоті 18 ГГц, 95% - 100% всіх подій дощу, що перевищують приблизно 15 дБ, можуть бути приписані неготовність. При такій відомій частці подій готовність може бути отримана шляхом множення цієї частки на загальний відсоток часу, коли дане ослаблення  $A$  перевищується, як визначено за методом, представленим в Рекомендації МСЕ-R P.530.

#### Сезонні коливання - найгірший місяць

Системне планування часто вимагає, щоб значення ослаблення перевищувались процентним ставленням часу  $P_W$  "гіршого місяця" (див. Рекомендацію МСЕ-R P.581)

Перехід від щорічних статистичних даних до статистичних даних "гіршого місяця" детально обговорюється в Рекомендації МСЕ-R P.841. Співвідношення між  $P_W$  і річним процентним ставленням часу,  $P$ , можна висловити як:

$$P = Q_1^{\frac{1}{1-\beta}} P_W^{\frac{1}{1-\beta}}. \quad (2.14)$$

Наведене вище вираз можна застосувати до діапазону ймовірностей (0,001% <  $P$  < 3%). В Рекомендації МСЕ-R P.841 вказані значення  $Q_1$  і  $\beta$ , знайдені в різних місцях і для декількох впливів поширення. Для цілей глобального планування може

бути краще окреме "усереднене" ставлення, що використовує  $Q1 = 2,85$  і  $\beta = 0,13$ , яке дає:

$$P = 0,3 P_w^{1,15}. \quad (2.15)$$

Результати вимірювань, отримані в різних кліматичних зонах, показують, що співвідношення щорічного усередненого відсоткового відношення часу гіршого місяці до усередненого щорічного процентному відношенню часу частково залежить від клімату. Наведене вище рівняння відповідає кліматичним зонам з відносно невеликими сезонними коливаннями в інтенсивності опадів. Для Середземноморської і Північно-Західної Європи та інших регіонів, показують схожі сезонні коливання в опадах, вказане вище значення  $P$  повинне бути зменшено на 20%, а для більш граничних випадків це значення  $P$  потрібно зменшити на 30%.

#### 2.4 Сценарії розгортання мережі в умовах міста

Один з можливих сценаріїв розгортання мережі 5G в умовах щільної міської забудови представлений на рис. 2.2. В районі міста одночасно працюють і взаємодіють між собою кілька малих сот SC: макро-стільники (Macro-Cell) - радіусом дії (1-2 км); мікро-стільники (Micro-Cell) - радіусом дії (0,5-1 км); піко-стільники (Pico-Cell) - радіусом дії (0,1-0,5 км).

Неліцензований діапазон 60 ГГц, з великим загасанням сигналу в атмосфері, дає можливість повторно використовувати виділені для провайдера частотні канали, а технології масивів MIMO для формування вузьких променів на базових станціях (BS) і точках доступу (AP), істотно знижують внутрісистемні перешкоди. У цьому випадку завдання годину-Тотнем планування для побудови малих сот стає не такою актуальною.



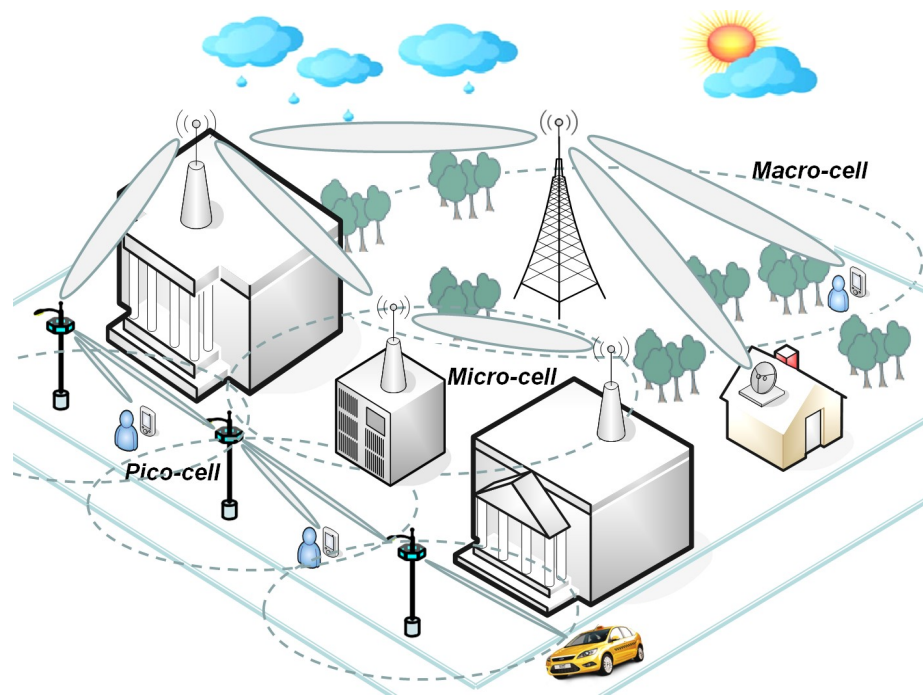


Рисунок 2.2 - Розповсюдження радіохвиль в умовах забудови

Особливістю сценарію також є застосування ММ ДХ, як для побудови елементів транспортної мережі (Backhaul link), так і ліній абонентського доступу (Access link) для термічної-лів користувачів D (Device) і пристроїв IoT (рис. 2.2).

Частотний 60 ГГц визнаний неліцензійним і його частотний розподіл представлено в табл. 2 для різних регіонів і країн світу [14].

Таблиця 2

Параметр	Країни і регіони світу				
	Північна Америка	Південна Америка	Японія	Австралія	Європа
Діапазон частот, ГГц	57-64	59-66	57-64	59,4-62,9	57-64
Полоса пропускання каналу, ГГц	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
Потужність передавача, $dBm$	-	10	10	10	27
Еквівалентна ізотропна потужність в антені (EIRP), $dBm$	40	57	57	51,8	40
	середня				середня
	43				43
	Пікова				пікова

Одним з параметрів наведеним в табл. 1 вказана еквівалентна ізотропна

потужність в антені EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power), яка є інтегральною енергетичною характеристикою передавача, що враховує спрямовані властивості антени. Формула (1) показує, що малопотужний радіопередавач з спрямованої антеною може створювати в деякому напрямку такий же рівень радіовипромінювання, що і потужний радіопередавач з слабонаправленою антеною.

$$EIRP = P_{TX} + G_{TX} \quad [dBm] \quad (2.16)$$

где:  $P_{TX}$  – потужність передавача,  $dBm$ ;  $G_{TX}$  – коефіцієнт посилення передавальної антени  $dBi$ .

Для визначення пропускної здатності каналу зв'язку, необхідно провести детальну оцінку бюджету радіолінії довжиною  $d$ , уключаючи потужність передавача  $EIRP$ , ослаблення сигналу 60 ГГц на трасі  $PL(d)$ , ослаблення за рахунок наявності кисню в атмосфері  $O(d)$ , вплив опадів у вигляді дощу  $R(d)$  і посилення приймальної антени  $G_{RX}$ .

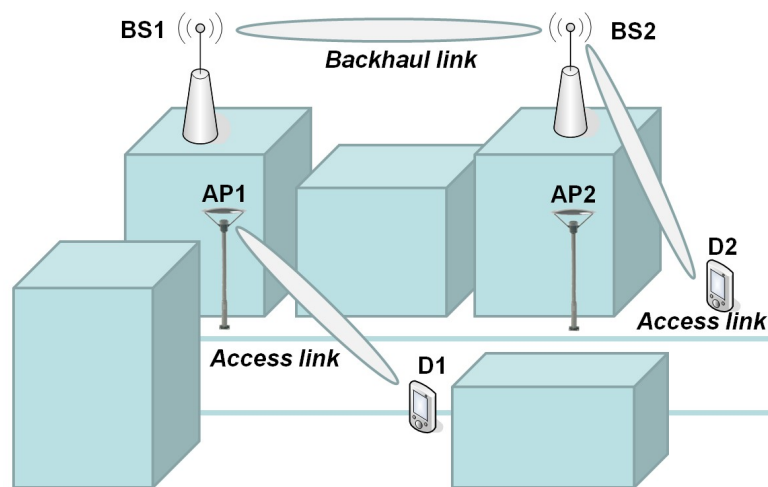


Рисунок 2.3 - Основні сценарії використання діапазону 60 ГГц для різних сегментів мережі в умовах міської забудови

Потужність сигналу в приймачі  $P_{RX}$  можна представити у вигляді:

$$P_{dB}^{RX}(d) = P_{TX} + G_{TX} - PL(d) - O(d) - R(d) + G_{RX} \quad [dB] \quad (2.17)$$

В умовах міської забудови для представлених на рис. 2.3 сегментів радіомережі можна використовувати дві основні моделі для розрахунку ослаблення

сигналу 60 ГГц  $PL(d)$  на трасі: модель прямої видимості (LOS) і модель вуличного каньйону (Street Canyon) [15, 16]:

$$PL(d)_{LOS} = 32,5 + 20 \log_{10}(f) + 10n \log_{10}(d/1000) \quad [dB] \quad (2.18)$$

$$PL(d)_{SC} = 82,02 + 10n \log_{10}(d/d_0) \Big|_{d_0=5} \quad [dB] \quad (2.19)$$

де:  $f$  - частота сигналу в ГГц;  $n$  - коефіцієнт, що залежить від умов поширення сигналу (2 ... 6) [15]:  $n=2$  для сценарію LOS;  $n=3-5$  для сценарію Street Canyon;  $d$  - відстань між передавальною і приймальною антенами, м;  $d_0$  - еталонна відстань,  $d_0 = 5m$

У таблиці 3 представлені величини коефіцієнта  $n$  для різних умов поширення.

Таблиця 3

Умови розповсюдження	$n$
Свободное пространство	2
Вільний простір	2,7-3,5
Простір в місті з щільною забудовою	3-5
Всередині будівель LOS	1,76-1,8
Всередині будівель NLOS	4-6

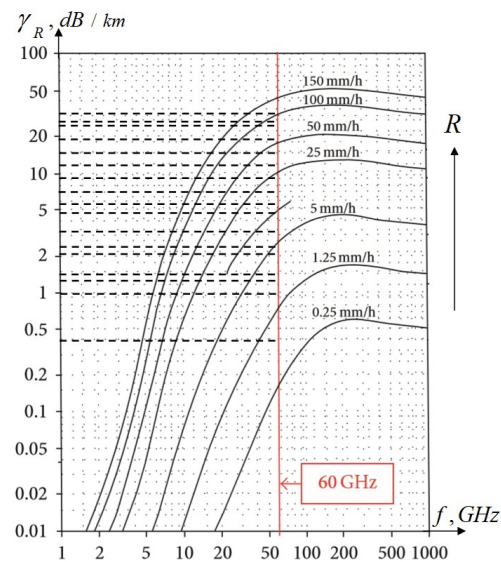
При розрахунку бюджету радіолінії ММ ДХ довжиною понад 100 м необхідно враховувати загасання в атмосферних газах (тобто поглинання в атмосферному кисні  $O_2$ ) і загасання в залежності від інтенсивності опадів.

Рівень поглинання в атмосферному кисні необхідно враховувати на радіотрасах довжиною понад 400 м і на частоті 60 ГГц складає  $O(d) = 16 \text{ dB/km}$  [10]. Для розрахунку загасання між передавальною і приймальною антенами в метрової шкалою  $O(d) = 16 \cdot d/1000 \text{ [dB/m]}$ .

Фактори загасання в дощах  $R(d)$  залежать від дощової кліматичної зони і регіструються Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU) [9]. Територія України розподілена в трьох кліматичних зонах по інтенсивності опадів (рис. 2.4а).



a)



б)

Рисунок 2.4 - Розташування України в трьох кліматичних зонах ІТУ (а) і залежність

погонного загасання  $\gamma_R$  від частоти сигналу і інтенсивності опадів  $R$  (б)

Дані ІТУ інтенсивності опадів за кліматичними зонами представлені в табл.

3.

$$R(d) = \gamma_R \cdot d / 1000 \text{ [dB/m]} \quad (2.20)$$

Величину погонного загасання сигналу 60 ГГц в дощі  $\gamma_R$ , в залежності від інтенсивності опадів  $R$  [мм / год], можна визначити, використовуючи графіки,

представлені на рис. 2.46 [9], [17]. На графіку пунктиром показані рівні загасання  $\mathcal{U}_R$  [дБ / км] в дощі.

Інтенсивність опадів, наявність хмар і інші локальні метеорологічні чинники атмосфери в ММ ДХ істотно впливають на здатність системи зв'язку забезпечувати передачу інформації із заданими показниками якості. Коефіцієнт готовності каналу зв'язку AR (availability ratio) визначається як відношення часу, коли канал зв'язку знаходиться в стані готовності до періоду спостереження, яке, як правило, береться рівним одному року (365,25 днів, 8766 годин). Коефіцієнт неготовності NR (unavailability ratio  $NR = 1-AR$ ) – визначається як частка часу, протягом якого тракт (з'єднання) на-ходиться в стані неготовності за період спостереження. Період часу неготовності на-чина відраховуватися з моменту появи послідовності з десяти секунд зі значи-них кількістю помилок [14].

У табл. 3 вказані чисельні значення рівнів загасання в дощі, для трьох клі-тичних зон Е (м.Харків), Н (м Львів), К (м.Київ) при різних показниках готовно сті лінії радіозв'язку AR.

Для завершення формування параметрів бюджету радіолінії приймемо величину посилення приймальні антени  $G_{RX}$  рівній коефіцієнту посилення передавальної антени  $G_{TX}$

Тоді

$$G_{RX} = G_{TX} = EIRP - P_{TX} = 43 - 27 = 16 \quad [dBi] \quad (2.21)$$

Вирази дозволяють розрахувати бюджет радіолінії в залежності від відстані  $d_{TX-RX}$  для різних кліматичних зон, сценаріїв розгортання, відсотки готовності лінії зв'язку AR.

Таблиця 4

Процент часу простоя NR (%)	Готовність лінії AR (%)	Дані інтенсивності опадів за кліматичними зонами і погонного загасання на частоті 60 ГГц					
		Зона E		Зона H		Зона K	
		R mm/h	$\gamma_R$ dB/km	R mm/h	$\gamma_R$ dB/km	R mm/h	$\gamma_R$ dB/km
1,0	99,0	0,6	0,4	2,0	1,2	1,5	1,0
0,3	99,7	2,4	1,4	4,0	2,0	4,2	2,2
0,1	99,9	6,0	3,5	10,0	4,9	12,0	7,0
0,03	99,97	12,0	7,0	18,0	8,0	23,0	9,1
0,01	99,99	22,0	9,0	32,0	12,0	42,0	15,0
0,003	99,997	41,0	14,9	55,0	23,0	70,0	26,0
0,001	99,999	70,0	26,0	83,0	29,0	100,0	32,0

Граничну пропускну здатність каналу зв'язку в залежності від відстані  $d_{TX-RX}$  між передавачем і приймачем, смуги пропускання і співвідношення сигнал / шум, можна оцінити виходячи з формули К.Шеннона [20]:

$$C(d) = BW_{60GHz} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_W^{RX}(d)}{N_W} \right) \quad [\text{бит/сек}] \quad (2.22)$$

де:  $BW$  - ширина смуги пропускання в Гц для діапазону 60ГГц ( $BW = 2.16 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ );  $P_W^{RX}(d)$  - потужність сигналу на вході приймача в Вт на відстані  $d$  від передавача ( $P_W^{RX}(d) = 10^{(P_{dB}^{RX}(d)/10)}$ );  $N_W$  - потужність шуму у Вт.  $N_W = 10^{(N_{dB}/10)}$

Потужність шуму  $N$  залежить від різних чинників: діапазону частот, смуги пропускання каналу радіозв'язку і шумів реалізації конкретної системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad [20],[21].

$$N_{dB} = k_B T_c + 10 \log_{10}(BW_{60GHz}) + L_I + n_F \quad [\text{дБ}] \quad (2.23)$$

де:  $k_B T_c$  - спектральна щільність потужності шуму; ( $k_B T_c = -174 \text{ дБ/Гц}$ ) - ширина смуги пропускання в Гц для діапазону 60 ГГц; - затухання при реалізації

апаратури стандарту IEEE 802.11ad ( $L_I = 10 \text{ dB}$ );  $n_F$  - коефіцієнт шуму апаратури стандарту IEEE 802.11ad ( $n_F = 5 \text{ dB}$ ).

Тоді для апаратури зв'язку стандарту IEEE 802.11ad отримуємо

$$N_{dB} = -65.6555 \quad [\text{dB}] \quad \text{и} \quad N_W = 2.72 \cdot 10^{-10} \quad [W] \quad (2.24)$$

На рис. 2.5 і 2.6 наведені залежності граничної швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку 60 ГГц в режимі точка-точка (Backhaul link) і в режимі абонентського доступу (Access link) для трьох кліматичних зон України.

Якщо в якості граничної мінімальної швидкості передачі інформації по каналу зв'язку взяти 2 Гбіт / сек (ця швидкість передачі необхідна для трансляції відео в реальному масштабі часу), то можна визначити максимальний радіус зони обслуговування для ба-зових станцій (Backhaul link) і мобільних абонентів мережі (Access link) в залежності від кліматичної зони України. Радіус дії для осередків мікро-стілньники (Micro-Cell): 950 м (зона К); 1000 м (зона Н) і 1050 м (зона Е). Радіус дії для осередків піко-стілньники (Pico-Cell): 180 м (зона К); 185 м (зона Н) і 190 м (зона Е).

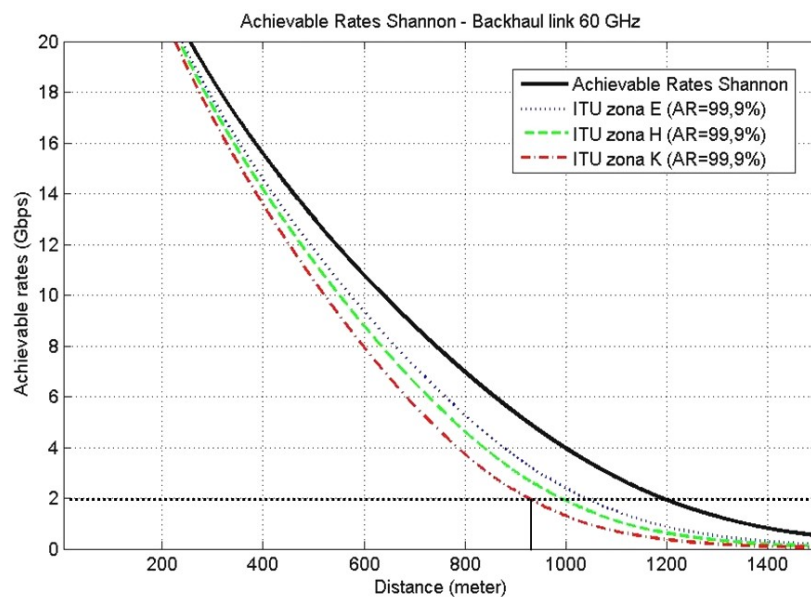


Рисунок 2.5 - Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі «точка-точка» (Backhaul link) 60 ГГц для трьох кліматичних зон України

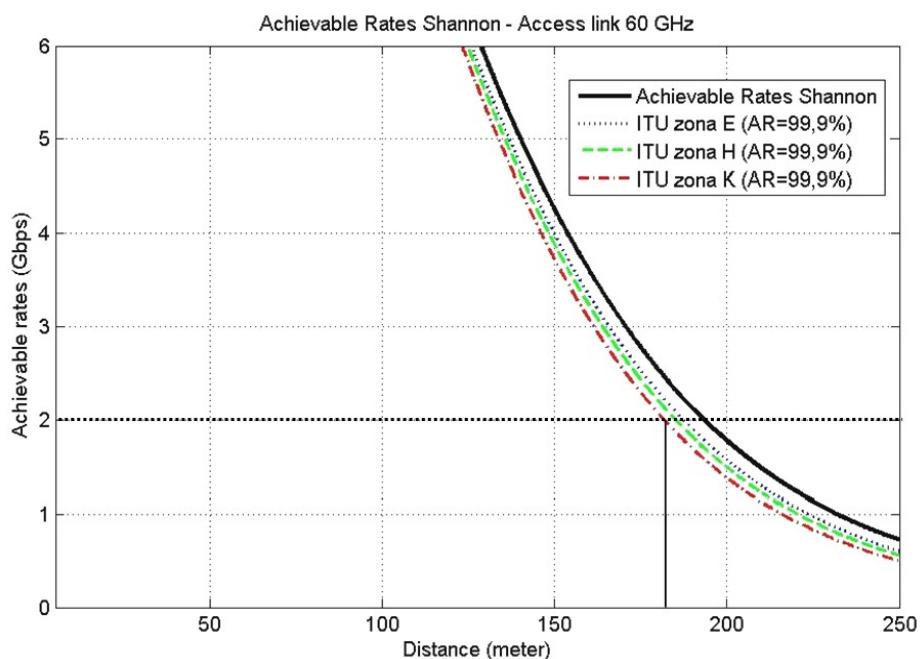


Рисунок 2.6 - Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц для трьох кліматичних зон України

Для оцінки реальної пропускної здатності каналу зв'язку на основі існуючих систем необхідно звернутися до стандарту IEEE 802.11ad [21], де вказані рекомендовані модуляційні схеми MCSi (Modulation and Coding Scheme) для трьох основних режимів роботи обладнання: з використанням однієї несучої SC (Single carrier), ортогонального частотного мультиплексування OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) і режими з низьким енергоспоживанням LPSC (Low-Power SC).

Для кожного з режимів роботи в стандарті запропоновані різні індекси модуляції, наведені величини чутливості приймача  $P_{RX}^{MCSi}$  і максимальна досяжна при цьому швидкість передачі інформації DR (Data rate).

У табл. 5 представлені дані про чутливість приймача для режиму роботи з використанням однієї несучої SC [21]. Цей режим є обов'язковим для всіх фірм виробників обладнання.



Таблиця 5

Схема $MCS_i$ для режиму $SC$	Чутливість приймача $RX$ $P_{RX}^{MCS_i}$ , $dBm$	Вид модуляції	Швидкість кода	Швидкість передачі даних $DR$ , $Mbit/c$
MCS0	-78 dBm	DBPSK	3/4	27,500
MCS1	-68 dBm	$\pi/2$ BPSK	1/2	385,00
MCS2	-66 dBm	$\pi/2$ BPSK	1/2	770,00
MCS3	-65 dBm	$\pi/2$ BPSK	5/8	962,50
MCS4	-64 dBm	$\pi/2$ BPSK	3/4	1155,00
MCS5	-62 dBm	$\pi/2$ BPSK	13/1	1251.25
			6	
MCS6	-63 dBm	$\pi/2$ QPSK	1/2	1540.00
MCS7	-62 dBm	$\pi/2$ QPSK	5/8	1925.00
MCS8	-61 dBm	$\pi/2$ QPSK	3/4	2310,00
MCS9	-59 dBm	$\pi/2$ QPSK	7/8	2502,50
MCS10	-55 dBm	$\pi/2$ 16QAM	1/2	3080,00
MCS11	-54 dBm	$\pi/2$ 16QAM	5/8	3850,00
MCS12	-53 dBm	$\pi/2$ 16QAM	3/4	4620,00

Якщо розрахована потужність прийнятого сигналу  $P_{dB}^{RX}$  вище, ніж чутливість приймача  $P_{RX}^{MCS_i}$  з індексом модуляції  $MCS_i$  і нижче чутливості приймача  $P_{RX}^{MCS_{i+1}}$  з індексом модуляції  $MCS_{i+1}$ , то процесор радіомодема IEEE 802.11ad встановлює індекс модуляції

$$P_{RX}^{MCS_i} < P_{dB}^{RX}(d) \leq P_{RX}^{MCS_{i+1}} \quad [dBm] \quad (7)$$

Тому, якщо відстань лінії бездротового зв'язку зростає, то стає нижче через загасання сигналу, і це призводить до зниження швидкості.

Конкретне значення порогів перемикання  $P_{RX}^{MCS_i}$  залежить від цільової функції алгоритму адаптації системи радіозв'язку: підтримка постійної потужності передавача на базовій станції, підтримання максимальної швидкості передачі інформації або підтримання необхідної якості каналу зв'язку.

На рис. 2.7 і 2.8 наведені залежності швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц в режимі точка-точка (Backhaul link) і в режимі абонентського доступу (Access link).

Якщо в якості граничної мінімальної швидкості передачі інформації по каналу зв'язку взяти 1 Гбіт / сек системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц, то можна визначити максимальний радіус зони обслуговування для базових станцій (Backhaul link) і мобільних абонентів мережі (Access link). Радіус дії для осередків мікро-стілники складе - 600 м; а заради-ус дії для осередків піко-стілники - 85 м.

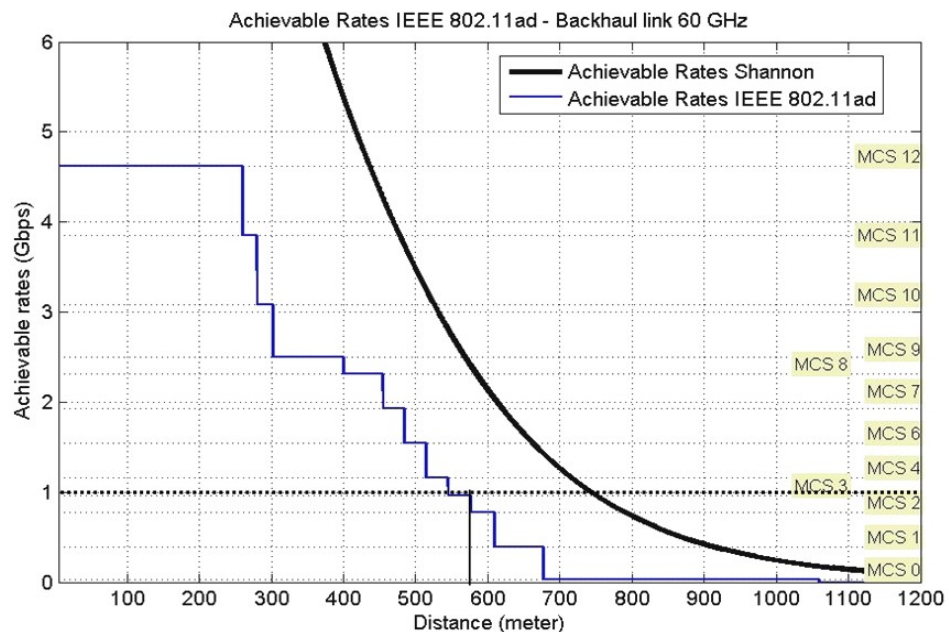


Рисунок 2.7 - Залежність швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц в режимі точка-точка (Backhaul link)

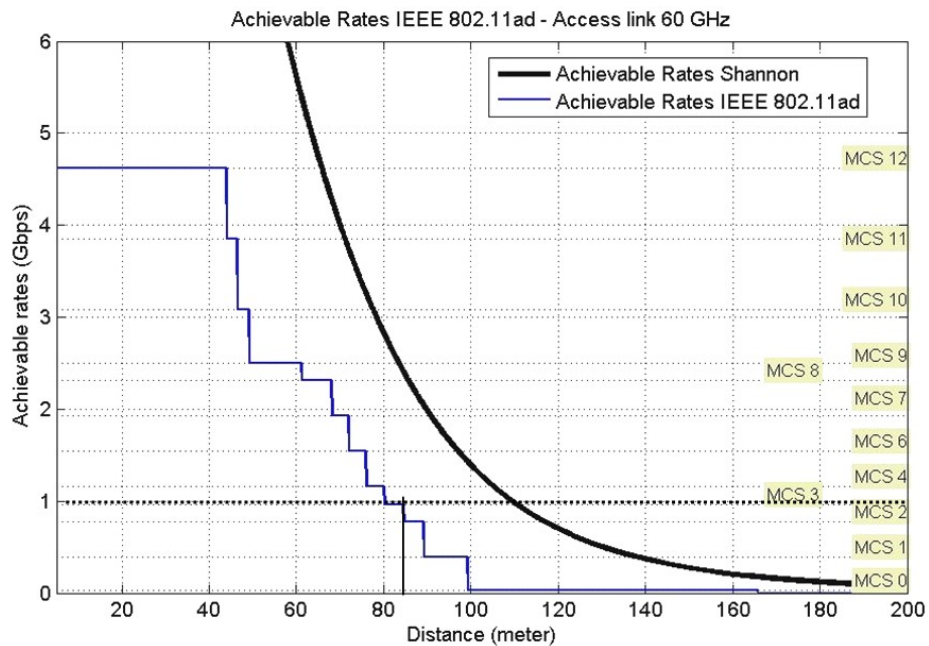


Рисунок 2.8 - Залежність швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту *IEEE 802.11ad* 60 ГГц в режимі абонентського доступу (*Access link*)

Оцінка впливу діаграм спрямованості антен на пропускну спроможність каналу зв'язку в випромінювання 60 ГГц

Для визначення пропускну здатності каналу зв'язку, необхідно провести детальне оцінку бюджету радіолінії довжиною  $d$ , що враховує потужність передавача  $EIRP$ , ослаблення сигналу 60 ГГц на трасі  $PL(d)$ , ослаблення за рахунок наявності кисню в атмосфері  $O(d)$ , вплив опадів у вигляді дощу  $R(d)$  і посилення приймальні антени  $G_{RX}$

Граничну пропускну здатність каналу зв'язку в залежності від відстані  $d_{TX-RX}$  між-ду передавачем і приймачем, смуги пропускання і співвідношення сигнал / шум, можна оцінити виходячи з формули К.Шеннона

$$C(d) = BW_{60GHz} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_W^{RX}(d)}{N_W + \sum_i I_W^i} \right) \quad [бум / сек] \quad (2.25)$$

де:  $BW$  - ширина смуги пропускання в Гц для діапазону 60 ГГц ( $BW = 2.16 \cdot 10^9$  Гц);  $P_W^{RX}(d)$  - потужність сигналу на вході приймача в Вт на відстані  $d$  від передавача ( $P_W^{RX}(d) = 10^{(P_{dB}^{RX}(d)/10)}$ );  $N_W$  - потужність шуму в Вт;  $N_W = 10^{(N_{dB}/10)} \sum_i I_W^i$  - шуми інтерференції від інших передавачів на радіотрасі.

Потужність шуму  $N$  залежить від різних чинників: діапазону частот, смуги пропускання каналу радіозв'язку і шумів реалізації конкретної системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad [8], [9].

$$N_{dB} = k_B T_c + 10 \log_{10}(BW_{60GHz}) + L_I + n_F \quad [dB] \quad (2.26)$$

де:  $k_B T_e$  - спектральна щільність потужності шуму ( $k_B T_e = -174$  дБ/Гц);  $BW$  - ширина смуги пропускання в Гц для діапазону 60 ГГц;  $L_I$  - затухання при реалізації апаратури стандарту IEEE 802.11ad ( $L_I = 10$  дБ);  $n_F$  - коефіцієнт шуму апаратури стандарту IEEE 802.11ad ( $n_F = 5$  дБ).

Тоді для апаратури зв'язку стандарту IEEE 802.11ad отримуємо

$$N_{dB} = -65.6555 \quad [dB] \quad \text{и} \quad N_W = 2.72 \cdot 10^{-10} \quad [W]. \quad (2.27)$$

Потужність сигналу в приймачі  $P_{RX}$  можна представити у вигляді:

$$P_{dB}^{RX}(d) = P_{TX} + G_{TX} - PL(d) - O(d) - R(d) + G_{RX} \quad [dB] \quad (2.28)$$

В умовах міської забудови для сегментів радіомережі можна використовувати дві основні моделі для розрахунку ослаблення сигналу 60 ГГц  $PL(d)$  на трасі: модель прямої видимості (LOS) і модель вуличного каньйону (Street Canyon) [9], [10]:

$$PL(d)_{LOS} = 32,5 + 20 \log_{10}(f) + 10n \log_{10}(d/1000) \quad [dB] \quad (2.29)$$

$$PL(d)_{SC} = 82,02 + 10n \log_{10}(d/d_0) \Big|_{d_0=5} \quad [dB] \quad (2.30)$$

де:  $f$  - частота сигналу в ГГц;  $n$  - коефіцієнт, що залежить від умов поширення сигналу (2 ... 6):  $n=2$  для сценарію LOS;  $n=3-5$  для сценарію Street Canyon;  $d$  - відстань між передавальною і приймальною антенами, м;  $d_0$  - еталонна відстань,  $d_0 = 5\text{ м}$

При розрахунку бюджету радіолінії ММ ДХ довжиною понад 100 м необхідно враховувати рівень поглинання в атмосферному кисні  $O(d)$  і загасання сигналу в дощі  $R(d)$ . На частоті 60 ГГц загасання сигналу для відстані між передавальною і приймальною антенами в метровій шкалою можна визначити з виразу  $O(d) = 16 \cdot d / 1000$  [dB/m] [11],[12].

Оцінку продуктивності і перешкодозахищеності системи зв'язку ми будемо вести з урахуванням діаграм спрямованості антен  $G_{mW}(\varphi, \theta)$  базових станцій BSi, точок доступу APj і уст-ройств користувачів Dk.

Реальна конструкція антени може мати досить складну діаграму спрямованості, яка ускладнює моделювання каналу зв'язку. Особливо це стосується фазованих антенних решіток з дуже великою кількістю випромінюючих елементів, таких як модульні антенні решітки МАА (Modular Antenna Arrays). Щоб спростити моделювання каналу зв'язку і одночасно прийняти до уваги основні характеристики реальних антен, скористаємося рекомендацією [13], в якій представлена модель антени, маю щей основний пелюстка з гаусовим профілем в лінійному масштабі і постійним рівнем бічних пелюсток.

Функція посилення головної пелюстки діаграми спрямованості антени  $G_{mW}(\varphi, \theta)$  визначається за допомогою двовимірної гаусом функції наступним чином:

$$G_{mW}(\varphi, \theta) = G_{mW}^{\max} \cdot \exp(-\alpha \cdot \varphi^2) \cdot \exp(-\beta \cdot \theta^2), \quad (2.40)$$

де  $\varphi$  - азимутальний кут в діапазоні  $[-\pi, +\pi]$ ;  $\theta$  - кут місця в діапазоні  $[-\pi/2, +\pi/2]$ ;  $G_{mW}^{\max}$  - максимальне посилення антени, відповідне напрямку ( $\varphi = 0, \theta = 0$ )

);  $\alpha$  і  $\beta$  - константи, які визначаються половинними значеннями ширина-ни променя потужності  $\varphi_{3dB}$  і  $\theta_{3dB}$  відповідно.

Рис. 2.9 ілюструє систему визначення координат і кутів.

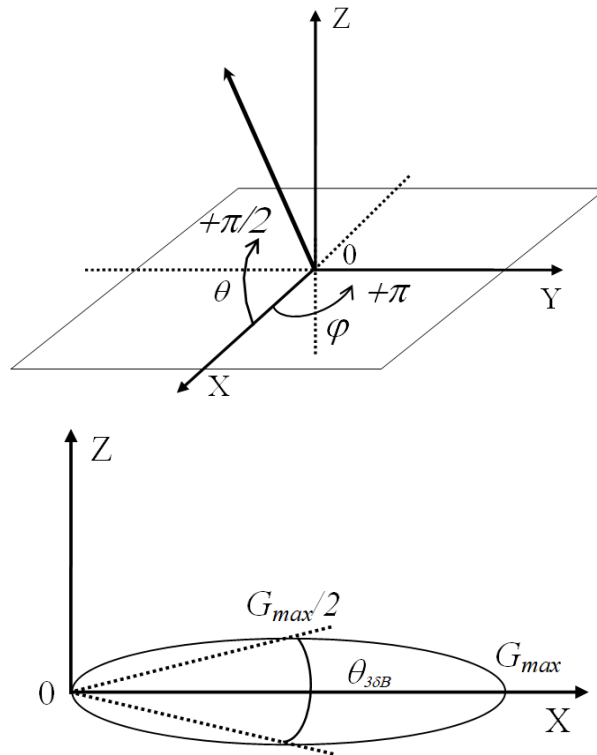


Рисунок 2.9 - Система визначення кутів і координат в зимутальній і вертикальній площинах діаграми спрямованості антени (ДНА)

Ширина променя половинній потужності для азимутального кута  $\varphi_{3dB}$  визначається при  $\theta = 0$  і для кута місця  $\theta_{3dB}$  при  $\varphi = 0$  наступним чином [14]:

$$\frac{G_{mW}(\varphi, \theta)}{G_{mW}^{\max}} = \exp \left\{ -\alpha \left( \frac{\varphi_{3dB}}{2} \right)^2 \right\} = 0,5 \quad (2.41)$$

$$\frac{G_{mW}(\varphi, \theta)}{G_{mW}^{\max}} = \exp \left\{ -\beta \left( \frac{\theta_{3dB}}{2} \right)^2 \right\} = 0,5 \quad (2.42)$$

Тоді коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  можна визначити, використовуючи такі вирази:

$$\alpha = \frac{4 \ln 2}{\varphi_{3dB}^2} \quad \text{і} \quad \beta = \frac{4 \ln 2}{\theta_{3dB}^2} \quad (2.43)$$

$$G_{mW}(\varphi, \theta) = G_{mW}^{\max} \cdot \exp\left(-4 \ln(2) \frac{\varphi^2}{\varphi_{3dB}^2}\right) \cdot \exp\left(-4 \ln(2) \frac{\theta^2}{\theta_{3dB}^2}\right) \quad (2.44)$$

Використовуючи вираз  $G_{dB}(\varphi, \theta) = 10 \cdot \log_{10}\{G_{mW}(\varphi, \theta)\}$  і з огляду на співвідношення  $\log_{10}(e) \cdot 4 \ln(2) \approx 12$  можна отримати вираз для функції посилення головної пелюстки діаграми спрямованості антени  $G_{dB}(\varphi, \theta)$  в шкалі дБ:

$$G_{dB}(\varphi, \theta) = G_{dBi}^{\max} - 12 \cdot \left(\frac{\varphi^2}{\varphi_{3dB}^2}\right) - 12 \cdot \left(\frac{\theta^2}{\theta_{3dB}^2}\right) \quad (2.45)$$

Кути  $\varphi_{3dB}$  і  $\theta_{3dB}$  можна обчислити, використовуючи співвідношення для еталонної моделі антени для діапазону 60 ГГц представленої в рекомендаціях ITU-R F.1336-4 [13]:

$$\theta_{3dB} = \frac{31000 \cdot 10^{-\frac{G_{dBi}^{\max}}{10}}}{\varphi_{3dB}} \quad (2.46)$$

Якщо припустити, що кути рівні  $\varphi_{3dB} \approx \theta_{3dB}$ , то

$$\varphi_{3dB} \approx \theta_{3dB} \approx \left(31000 \cdot 10^{-\frac{G_{dBi}^{\max}}{10}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.47)$$

У табл. 6 наведені дані про ширину головного пелюстка в градусах на рівні половинної потужності діаграми спрямованості антени ( $\varphi_{3dB} \approx \theta_{3dB}$ ) в залежності від максимального посилення антени  $G_{dBi}^{\max}$ .

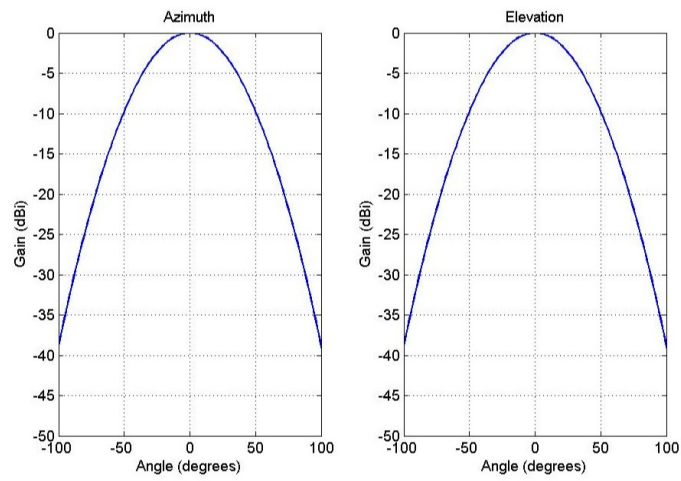
Таблиця 6

№	$G_{dBi}^{max}$ , дБ	$\varphi_{3dB} \approx \theta_{3dB}$ , град
1	10	55,6776
2	15	31,3098
3	20	17,6068
4	25	9,9010
5	30	5,5677
6	35	3,1309
7	40	1,7606
8	45	0,9901
9	50	0,5567

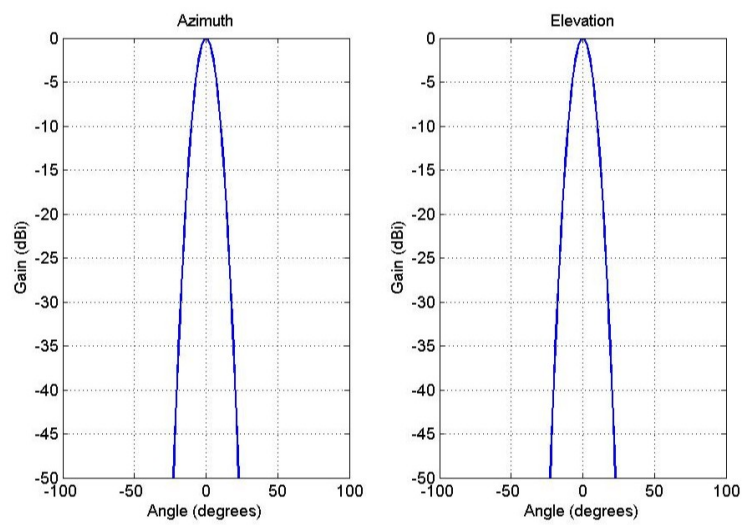
Дані в табл. показують, що істотне збільшення енергетичного потенціала каналу зв'язку в ММ ДХ пов'язано із застосуванням модульних антенних ґрат МАА, що дозволяють реалізувати великі значення  $G_{dBi}^{max}$  при малих кутах розкриття ДНА.

На рис. 2.10-2.11 представлені 2D і 3D діаграми спрямованості антени з гаусовим профілем основної пелюстки при різних значеннях максимального посилення антени  $G_{dBi}^{max}$ .

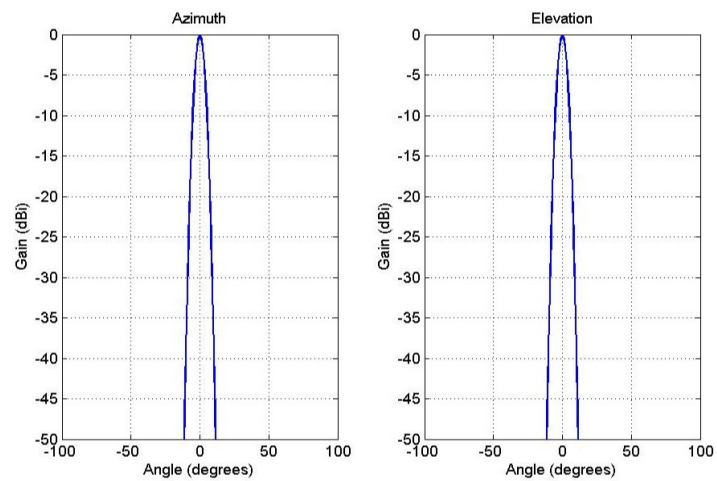




а)

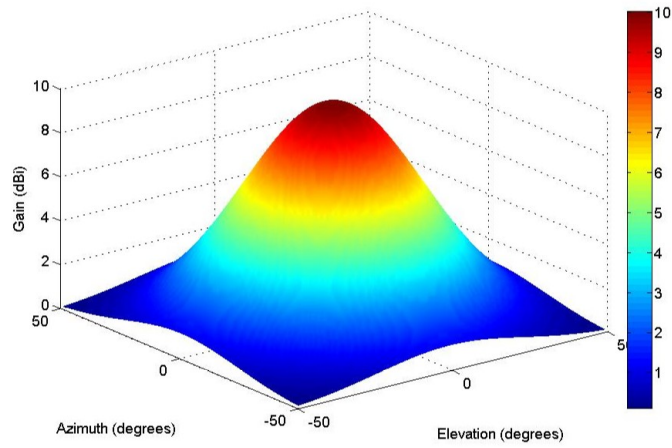


б)

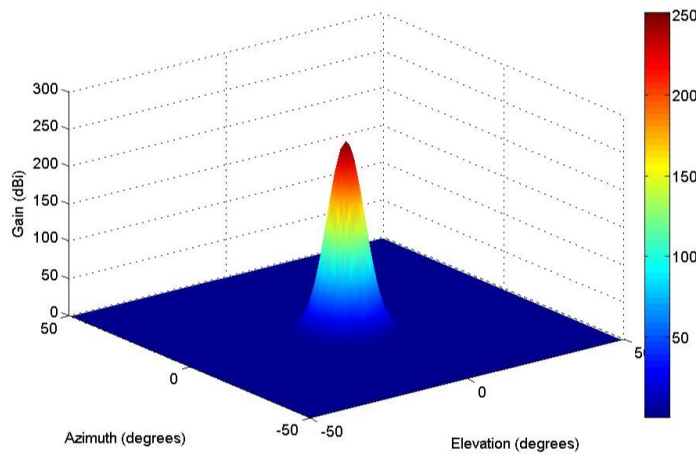


в)

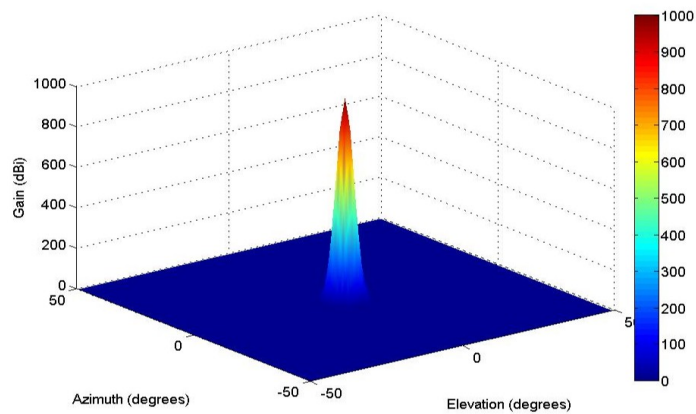
Рисунок 2.10 - 2D діаграми спрямованості антени з гаусовим профілем основного пелюстки з максимальним посиленням антени: а) 10 dBi; б) 24 dBi; в) 30 dBi.



а)



б)



в)

Рисунок 2.11 - 3D діаграми спрямованості антени з гаусовим профілем основного пелюстка з максимальним посиленням антени: а) 10 dBi; б) 24 dBi; в) 30 dBi.

На рис. 2.10 і 2.11 наведені залежності граничної швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку 60 ГГц в режимі точка-точка (Backhaul link) і в режимі абонентського доступу (Access link) в залежності від максимального значення посилення ан-тени в головному пелюстку. Представлені залежності отримані без врахування впливу дощу в зоні дії системи зв'язку і впливу інтерференції від інших абонентів, базових станцій і точок доступу.

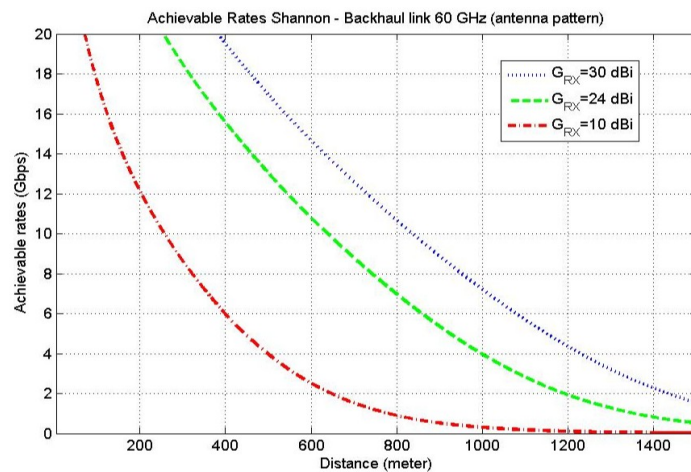


Рисунок 2.12 - Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі «точка-точка» (Backhaul link) 60 ГГц в залежності від максимального значення посилення антени

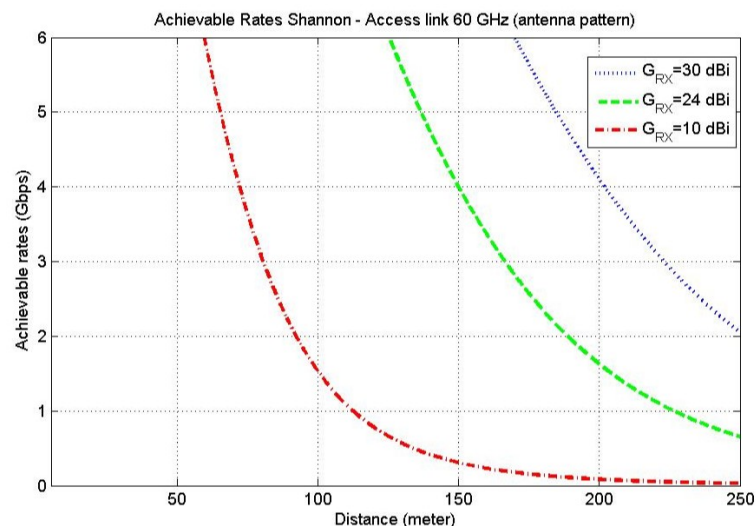


Рисунок 2.13 - Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц в залежності від максимального значення посилення антени

На рис.2.14 прставлений один з можливих сценаріїв інтерференційного впливу користувальницьких терміналів  $UD_j$ , точок доступу  $AP_i$  і базових станцій  $BS_k$  в режимі або-абонентського доступу (Access link) 60 ГГц.

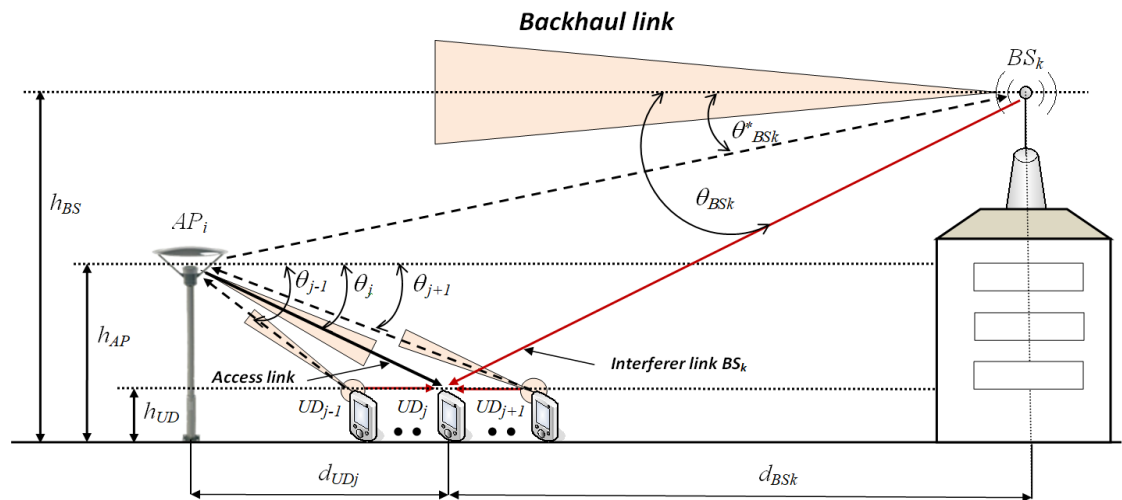


Рисунок 2.14 - Сценарій інтерференційного впливу користувальницьких терміналів (UD) і базових станцій (BS) в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц

Рівень інтерференційного (заважає) сигналу в точці прийому мобільним абонентом можна представити у вигляді суми, яка визначається кількістю мобільних абонентів поблизу точки прийому основного каналу, з урахуванням діаграм спрямованості антен як передають, так і прийомних антен:

$$I_{dB}^{RX}(d_{UD}) = \sum_i \left[ P_{TX}^{AP_i} + G_{TX}^{AP_i}(\varphi, \theta) - PL(d_{UD}) - O(d_{UD}) - R(d_{UD}) + G_{RX}^{UD_j}(\varphi, \theta) \right] \quad [dB] \quad (2.48)$$

$$I_{dB}^{RX}(d_{BS}) = \sum_k \left[ P_{TX}^{BS_k} + G_{TX}^{BS_k}(\varphi, \theta) - PL(d_{BS}) - O(d_{BS}) - R(d_{BS}) + G_{RX}^{UD_j}(\varphi, \theta) \right] \quad [dB] \quad (2.49)$$

На рис. 2.15. представлена залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу при інтерференційному вплив користувальницьких терміналів (UD) і базових станцій (BS) в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц.

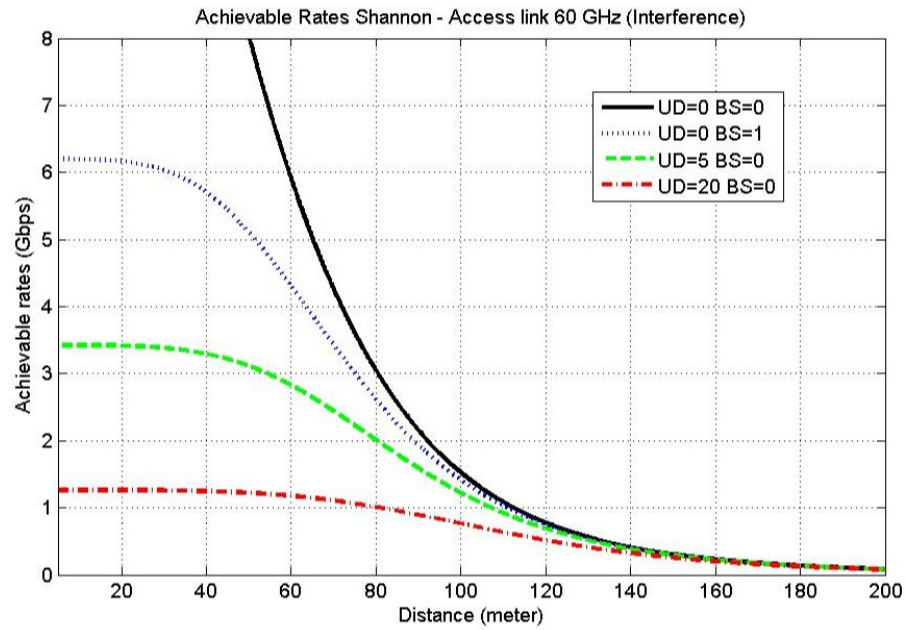


Рис. 2.15. Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу при інтерференційному вплив користувальницьких терміналів (UD) і базових станцій (BS) в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц

З даного розділу можна зробити висновки що антени міліметрового діапазону повинні знаходитися на відстані не більше 1 км. Для стабільної роботи радіомосту. Та побачили що чим більше відстань від антен тим менше швидкість прийомо-передачі.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРАХУНКІВ

#### 3.1. Кумулятивний розподіл

Клімат в Харкові, з точки зору розглянутої проблеми характеризується тим, що з липня по серпень триває посушливий період, під час якого зволоження відбувається переважно грозами. Пік опадів припадає на грозовий червень і липень (по 61 мм). У липні опади зазвичай бувають кілька разів, але ці грозові дощі мають зливовий характер і відрізняються величезною силою. Ця обставина може бути найбільш деструктивним чинником, що порушує працездатність проєктованих тропосферних і наземно-космічних ліній зв'язку.

Найважливішим параметром, що визначає надійність лінії зв'язку, є параметр готовності (неготовності) лінії зв'язку, який кількісно характеризує ймовірність порушення зв'язку [2]. Розрахувати значення параметра готовності / неготовності лінії зв'язку можна, використовуючи рекомендації міжнародного союзу з телекомунікацій ІТУ [3-4]. З наведених виразів випливає, що в основі прогнозування значень коефіцієнта готовності, крім конкретизації поставлених апаратурних параметрів лінії зв'язку (чутливість приймача, яку випромінює потужність передавача, коефіцієнт посилення антени і ін.) В ММ ДХ вкрай важливі дані про кумулятивної функції розподілу атмосферного ослаблення для кожного розглянутого регіону. Адже, ослаблення, викликане дощем і потужної купчасто хмарністю, є основною причиною перебоїв в роботі систем тропосферного та супутникового зв'язку, що використовують СМ і ММ діапазони хвиль (ДХ).

Кумулятивний розподіл погонного ослаблення в дощах (дБ \ км) показує ймовірність перевищення того чи іншого значення атмосферного ослаблення. Його досить просто визначити за допомогою наявних радіофізичних моделей, якщо відомо статистичний розподіл інтенсивності дощів  $p$  ( $R$ ) (ймовірність  $p$ , для якої величина інтенсивності дощів більше  $R$ ). При цьому треба мати на увазі, що для цих

цілей необхідне використання метео-даних з однохвилинне інтервалом усереднення. Зважаючи на важливість отримання максимально адекватних оцінок прогнозування надійності зв'язку, ІТУ рекомендує здійснювати облік мікрокліматичних особливостей розглянутих регіонів шляхом експериментального накопичення сезонної і річної статистики атмосферного ослаблення з однохвилинне інтервалом усереднення. У ряді країн світу довготривалі цикли такого роду експериментальних досліджень вже проведені або проводяться.

Для території України такі експериментальні дані про кумулятивних функціях повного вертикального і погонного горизонтального атмосферного ослаблення в ММ ДХ відсутні. Також відсутні такі метеорологічні дані, необхідні для адекватного розрахунку статистики ослаблення радіохвиль, як тимчасовий розподіл водозапаса хмар і однохвилинне інтенсивності дощів.

Вихідні дані для побудови експериментально обґрунтованих кумулятивних функцій розподілу повного вертикального ослаблення радіохвиль СМ і ММ ДХ на похилих трасах можна отримати трьома шляхами.

1. Шляхом визначення значень повного атмосферного ослаблення на похилих трасах методами радіометрії на окремих частотах.
2. Методом бекон-зондування атмосфери шляхом її просвічування в сюжеті ДХ за допомогою передавачів геостационарних супутників.
3. Розрахунковим шляхом на основі виміряних кумулятивних функцій інтенсивності дощів з використанням регіонально залежних моделей для розмірів дощових осередків і просторової неоднорідності хмарної вологи, ефективної довжини шляху і ефективної висоти дощу, які рекомендовані для цих завдань ІТУ-R.

Відсутність відповідного для цих цілей геостационарного супутника з променем опромінення території України, а також похибки розрахункового методу внаслідок сумарних похибок групи використовуваних моделей робить перший шлях отримання потрібних даних більш привабливим.

Вихідні дані для побудови експериментально обґрунтованих кумулятивних функцій розподілу приземного погонного ослаблення радіохвиль СМ і ММ ДХ можна отримати двома шляхами:

1. Експериментально, шляхом набору довготривалої статистики безперервної зміни горизонтального погонного атмосферного ослаблення на приземних поїнт-то-поїнт трасах. Дослідження довготривалих даних показали, що, як правило, відповідний для практичного використання період безперервного накопичення таких даних становить 3-7 років [11].

2. Розрахунковим шляхом, на основі експериментальних даних про тимчасовий розподіл дощу з застосуванням радіофізичних моделей адекватно пов'язують інтенсивність дощу з величиною погонного ослаблення в тому чи іншому діапазоні хвиль.

Незважаючи на те, що перший шлях вважається кращим з точки зору точності проведених оцінок, його істотним недоліком є відносна складність підготовки та реалізації такої тривалої програми безперервних поїнт-то-поїнт радіофізичних спостережень.

До переваг досить широко використовуюваного в світі другого підходу можна віднести наявність багаторічних баз-даних, що містять інтенсивності опадів, що випали в розгалуженої мережі метеостанцій, а також наявність радіофізичних моделей, які досить точно описують величину погонного ослаблення для різних інтенсивностей дощу в різних діапазонах радіохвиль (як правило, від 5% в районі 10ГГц до 30% на частотах близько 1000ГГц). До недоліків цього підходу варто віднести те, що в переважній більшості баз багаторічних даних значення інтенсивності дощу представлені з часом усереднення (Т) від 20 до 60 хвилин. У той час, як для розрахунків загасання на трасі визнані найбільш придатними однохвилинний періоди усереднення інтенсивності дощу. Ця обставина викликає необхідність перерахунків Т-хвилинних в 1 хвилинні дані, шляхом використання додаткових моделей, які також мають мікрокліматичні особливості, що може призводити до додаткових похибок. Тому, більш точне рішення в цьому підході бачиться у використанні сучасних автоматизованих дощомірів з 1-хвилинним часом



інтегрування для довготривалого накопичення статистичної інформації про інтенсивність дощів в даному регіоні.

### 3.2. Умови технічного забезпечення та обмеження

Основним компонентом загасання критично важливих для зв'язку сигналів є дощ. Загальний внесок газів, пари, туману та снігу в загасання атмосфери на горизонтальних доріжках за наявності дощу не перевищує 10-30%. Дані у вигляді річної ймовірності значень опадів надаються в більшості попередніх досліджень опадів для використання в моделях ослаблення. Однак щорічна статистика може вводити в оману, оскільки в більшості місць події критичного інтенсивності дощу (які викликають перебої в лінії зв'язку) зосереджені лише в певні місяці року. Низька річна ймовірність перерв зв'язку через дощ може бути неприпустимо високою в ці місяці. Тому щомісячна або сезонна статистика, крім середньорічних розподілів значень ймовірності інтенсивності дощу, повинна враховуватися.

У цій роботі ми використали обчислювальний підхід для побудови кумулятивної функції специфічного загасання в діапазоні ймовірностей, критичних для розриву зв'язку, який базується на експериментальних даних про часовий розподіл інтенсивності дощу. Інтенсивність дощу вимірювали на ХАІ безперервно протягом 4 місяців 2018 року (червень-вересень) та того ж періоду 2019 року, використовуючи автоматизовану бездротову метеостанцію TFA OPUS з 5-хвилинним режимом усереднення опадів.

Розрахунок питомого ослаблення в дощі проводився за допомогою моделі MPM, яка забезпечує похибку менше 5% для робочих частот нижче 100 ГГц [12].

В якості критерію відключення зв'язку через дощ, наприклад, може бути використана порогова швидкість дощу, перевищення якої спричиняє загальне ослаблення 15 дБ [1] на шляху 1 км для розглянутих тут частот 12 ГГц, 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц.

### 3.3. Апаратурно-методичне забезпечення і умови спостережень

Визначення характеристик повного вертикального ослаблення в атмосфері.

Знання статистичних параметрів ослаблення сигналу на похилих трасах через опади та купчастих типів хмарності необхідно при визначенні надійності і продуктивності супутникових ліній зв'язку. Для отримання цих даних ми використовували експериментальний підхід, який заснований на визначенні значень повного вертикального ослаблення за даними безперервного радіометричного моніторингу інтенсивності спадного радіотеплового випромінювання атмосфери в 8-ми ММ ДХ.

Набір статистики повного вертикального ослаблення в атмосфері був проведений для найбільш несприятливого, з точки зору проходження сигналу, літнього місяця, - червень. Виміри проводилися цілодобово в фіксованому напрямку 40° від зеніту. Калібрування радіометра здійснювалася методом двох навантажень з контрольованими термодинамічними температурами навколишнього середовища і кипіння рідкого азоту. Флуктуаційна чутливість радіометра модуляційного типу діапазону 39 ГГц [10] становила 0.2 К. Інтервал вибірки даних - 10 сек. При аналізі отриманих даних в якості критерію аутажа зв'язку ми використовували порогові значення загального загасання на похилій трасі близько 15 дБ [22].

Розрахунок значень повного вертикального ослаблення атмосферою в цій роботі був проведений за допомогою таких висловів:

$$T_a = T_o - S \blacktriangle U_a \quad (3.1)$$

де  $T_a$  - антенна температура неба;  $S$  - калібровочний коефіцієнт радіометра (К \ B);  $\blacktriangle U_a$  - різниця вихідних показань радіометра, антена якого спрямована черзі на узгоджене навантаження і в небо.

$$T_a = T_\alpha(1-\beta) + T_\phi\beta - 2,73 e^{-\tau \text{Sec}\theta} \quad (3.2)$$

Визначення параметрів приземного погонного ослаблення.

Основним компонентом критичних для приземної зв'язку послаблень сигналу є дощ. Сумарний внесок газів, пара, туману і снігу в атмосферне ослаблення на горизонтальних трасах при наявності дощу не перевищує 10-30%.

У цій роботі для побудови кумулятивної функції погонного ослаблення в діапазоні критичних для ймовірностей порушення зв'язку значень ми використовували розрахунковий підхід, який заснований на експериментальних даних про тимчасовий розподіл інтенсивності дощу. Вимірювання інтенсивності дощу проводилися в KhAI безперервно протягом 4-х місяців 2018 (червень-вересень) за допомогою автоматизованої wireless weather station TFA OPUS. Розрахунки значень погонного ослаблення в дощах були проведені за допомогою MPM моделі [25].

Як критерій аутажу зв'язку ми використовували умовно критичні інтенсивності дощу, які могли б викликати загальне затухання 15 дБ [24] на трасі довжиною 1 км для розглянутих частот 28ГГц, 38ГГц, 60ГГц і 94 ГГц.

У більшості попередніх досліджень короткочасних дощових опадів для використання в моделях ослаблення наводяться дані у вигляді річних частот зустрічальності дощових опадів. Проте, щорічні статистичні дані можуть вводити в оману, оскільки в більшості місць події дощів мають інтенсивності вище критичних (коли інтенсивність дощів може викликати перебої в лінії зв'язку) зосереджені тільки в окремих місцях року. Низька річна частота виникнення перебоїв зв'язку з причини дощу може бути неприпустимо високою в ці місяці. Тому кращі щомісячні або сезонні статистичні дані про інтенсивність дощу.

У даній роботі з приватних причин технічного і організаційного характеру був використаний вельми близький до 1 хв., - 5хв режим усереднення. Для подальшого перерахунку, інтегральна функція розподілу інтенсивності дощових опадів при часу інтегрування 1 хвилина може бути отримана шляхом перетворення інтегральних функцій розподілу при більш тривалому часу інтегрування (відповідно до Рекомендацій ITU-R837-6). Однак, необхідно мати на увазі, що ця та інші подібні моделі мають мікрокліматичні особливості, що може призводити до додаткових похибок.

### 3.4 Результати розрахунків

#### Ослаблення сигналу на похилій трасі

У загальному випадку, тривалість завмирань на похилій трасі є функцією частоти, кута місця і типу дощу або купчасто хмарності. При заданому порозі ослаблення сигналу тривалість завмирання буде збільшуватися зі збільшенням частоти і зменшенням кута місця.

На рисунку 3.1 наведена кумулятивна функція значень повного вертикального ослаблення в атмосфері (в напрямку зеніту) отримана нами методом цілодобових радіометричних спостережень радіояркості власного радіотеплового випромінювання атмосфери на частоті 39 ГГц для найгіршого місяця (червень) в Харкові.

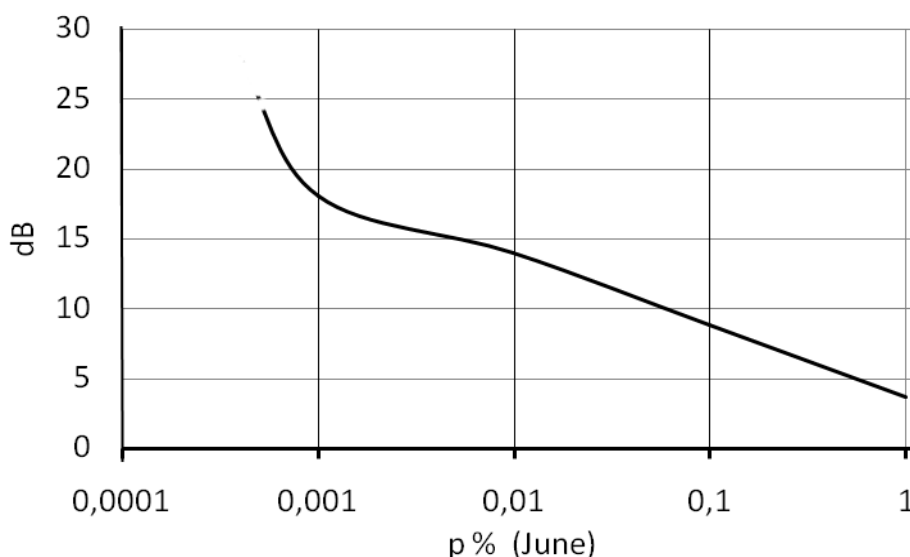


Рисунок 3.1 - Кумулятивне розподіл повного вертикального ослаблення в атмосфері атмосфери для частоти 39 ГГц (червень, Харків)

Отримані експериментальним шляхом і представлені на рис. 3.1 залежно дають можливість провести оцінний перерахунок і для інших частот і кутів візування. При перерахунку експериментальних значень ослаблення з частоти 39 ГГц на інші частоти слід мати на увазі, що в більшості випадків спостерігається комбінований ефект різних механізмів ослаблення (головним чином за рахунок дощу і хмар) з відмінною, в загальному випадку, частотної залежністю для

крапельної вологи хмар і дощу. Отже, має сенс проводити такі частотні порівняння, обмежуючись лише одним з послаблюють ефектів. Так, при використанні систем з низьким запасом на завмирання, загасання через хмари на частотах ММ ДХ також може бути значним. Водозапас великих купчастих хмар в середніх широтах протягом року, за модельним оцінками ІТУ-Р Р.840-6 з ймовірністю 99,9% не перевищує  $2 \text{ кг}\backslash\text{м}^2$ . Розрахунки показують, що, наприклад, на частотах близько 12 ГГц такий водозапас викликає вертикальне загасання не більше 0.2 дБ. Однак, використовуючи дані роботи [14] можна показати, що, наприклад, для температур хмарних крапель +100 С для частот 19ГГц, 39 ГГц і 94ГГц значення ослаблення збільшаться в 2.5, 10 і 40 разів відповідно. У міру збільшення кута візування до  $85^\circ$  від зеніту, значення ослаблення на кожній частоті можуть збільшитися ще до 12 разів відповідно до величини  $\text{Sec}\theta$ .

Для аналогічних оцінок частотної і кутової залежності ослаблення сигналу в дощі для даного регіону можна використовувати пропоновані ІТУ-Р Р.837-7 моделі. Відповідно до них з ймовірністю 99.99% інтенсивність дощу в регіоні Харкова не повинна перевищувати 25 мм \ год. Для такої інтенсивності дощу зростання вираженого в дБ ослаблення сигналу на частотах 19ГГц, 39 ГГц і 94ГГц в порівнянні з частотою 12 ГГц складе 2.6, 9.5 і 16 разів відповідно.

Корисно помітити, що близькість коефіцієнтів частотного перерахунку для хмарних крапель і крапель дощу, по крайній мере, в частотному діапазоні до 40ГГц дозволяє розраховувати на адекватність проведення таких оцінок. У більш високочастотних діапазонах точність таких частотних перерахунків може знизитися багаторазово через труднощі поділу вкладів дощу і хмар в загальне ослаблення при істотному розходженні перерахункових коефіцієнтів для цих середовищ. У міру зміни кута візування, оцінювані значення ослаблення в дощі на кожній частоті можуть збільшитися, як і в разі хмар відповідно до величини близької  $\text{Sec}\theta$ .

Роведений вище аналіз отриманої в 8-ми ММ ДХ залежності і обговорення результатів оціночних розрахунків показують, що в погодних умовах червня в зенітному напрямку для ймовірностей до 0.01% повне вертикальне ослаблення в атмосфері не повинно перевищувати 15 дБ значення на частотах нижче 40 ГГц.

Однак, при використанні кутів візування, віддалених від zenіту більш, ніж на 60 градусів перевищення цього умовно обраного порога буде швидко наростати в міру збільшення кута  $\theta$  на похилих трасах і збільшення робочих частот. На відміну від червень-липневого періоду прогнозування, для однорічного періоду розгляду слід очікувати приблизно десятикратне поліпшення ситуації з розглянутими можливостями перевищення дБ порогів, які вибирають для оцінок аутажа зв'язку.

#### Погонное ослаблення сигналу на приземної трасі

На рис.3.2 наведені ймовірності перевищення значень інтенсивності дощу (які відкладені на осі абсцис), отримані нами на підставі метеорологічних спостережень з 5-хв інтервалом інтегрування в перебігу 4-х теплих місяців 2018.

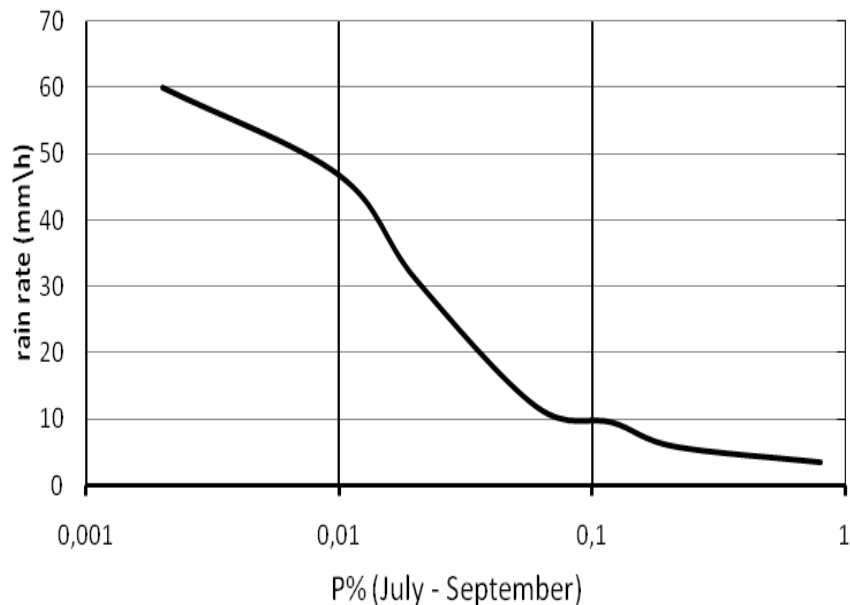


Рисунок 3.2 - Кумулятивне розподіл інтенсивності дощів за 4-х місячний період 2018 (червень-вересень) в г. Харків (50с.ш. 36в.д.), Україна.

Загальна за аналізований 4-х місячний період 2018 року час випадання опадів становила 990 хвилин, - 240мін. в червні, 415мін. в липні, 35 хв. в серпні і 300 хв. у вересні.

На основі цих метеорологічних даних ми провели розрахунки атмосферного ослаблення за допомогою МРМ моделі для частот 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц.

На рис. 3.3 наведені розрахункові залежності кумулятивного розподілу погонного ослаблення атмосфери для частот 28 ГГц, 38ГГц, 60ГГц і 94 ГГц в липні 2018, а на рис.3.4 - для червня.

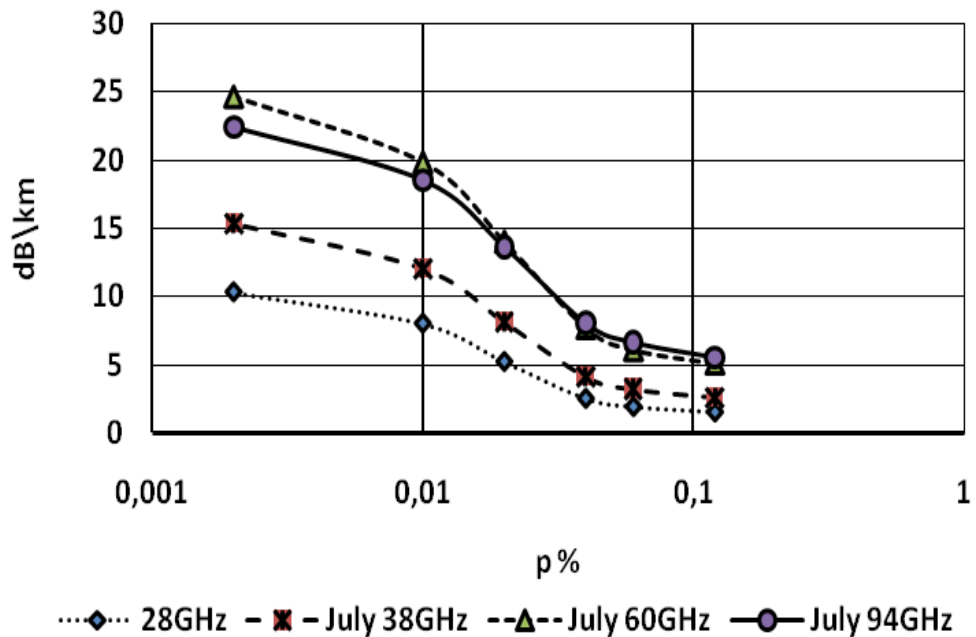


Рисунок 3.3 - Кумулятивне розподіл погонного ослаблення атмосфери для частот 28 ГГц, 38ГГц, 60ГГц і 94 ГГц (July)

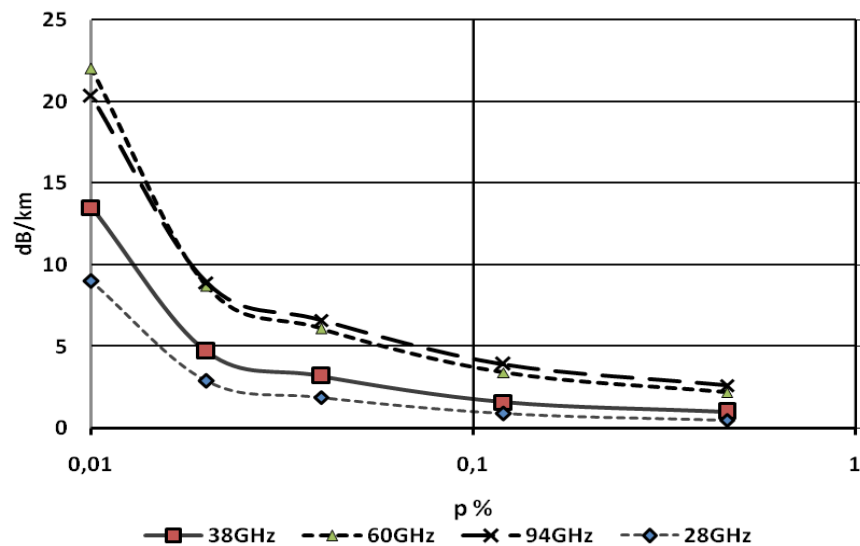


Рисунок 3.4 - Кумулятивне розподіл погонного ослаблення атмосфери для частот 28ГГц, 38ГГц, 60ГГц і 94 ГГц (Червень)

Як для серпня, так і для вересня для  $p = 0.01\%$  ослаблення становить 1.4, 4.1, 7.7 і 8 дБ \ км для 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц відповідно.

Отримані дані продемонстрували, що для  $p = 0.01\%$  за період 4-х теплих місяців ослаблення в зенітному напрямку не перевищує 9 дБ \ км, по крайній мере, для 2018. Відповідно, для річного періоду спостережень слід очікувати ще більш низькі (в 2.5- 3 рази) ймовірності екстремально підвищених значень погонного ослаблення. Однак якщо розглядати проблеми зі зв'язком в найгірші місяці (червень-липень), то для кожного з них окремо, ослаблення з вірогідністю 0.01% (рис.3.4) на частотах 60ГГц і 94 ГГц буде перевищувати відзначений вище поріг порушення зв'язку (15дБ \ км).

Питання тривалості подій опадів, що викликають перебої зв'язку та їх межгодічної мінливості, а також питання адекватності ІТУ-R формул перекладу Т-хвилинних даних про інтенсивність дощу в 1-хвилинні в даному регіоні України заслуговують подальшого додаткового дослідження для високочастотних мереж тропосферного та супутникового зв'язку.

Середньорічна кількість опадів у Харкові становить 517 мм. Пік опадів спостерігається при грозах у червні та липні (по 61 мм кожна). Оподи зазвичай трапляються кілька разів у липні, але ці грози бувають дощовими і надзвичайно потужні. Ця обставина може бути найбільш руйнівним фактором, який порушує працездатність спроектованих тропосферних ліній та мереж зв'язку.

Найважливішим параметром, що визначає надійність лінії зв'язку, є параметр доступності (недоступності) лінії зв'язку, який кількісно характеризує ймовірність збою зв'язку [2]. Можна розрахувати параметр готовності / недоступності лінії зв'язку, використовуючи рекомендації Міжнародного союзу електрозв'язку МСЕ [3-4].

Важливими є дані про кумулятивну функцію розподілу загасання атмосфери для кожної розглянутої області, крім уточнення визначених апаратних параметрів лінії зв'язку (чутливість приймача, випромінювана потужність передавача, посилення антени тощо) в ММ ДХ. для прогнозування значень коефіцієнта доступності [3-4]. Дійсно, ослаблення, спричинене дощем, є основною причиною



перебоїв у роботі тропосферних систем зв'язку, що використовують довжину хвиль СМ та ММ.

Сукупний розподіл питомого загасання в дощі (дБ \ км) показує ймовірність перевищення того чи іншого значення атмосферного загасання. Визначити його за допомогою доступних радіофізичних моделей досить просто, якщо відомий статистичний розподіл інтенсивності дощу  $p(R)$  (ймовірність  $p$ , для якої значення інтенсивності дощу більше  $R$ ). Слід мати на увазі, що для цих цілей необхідно використовувати метеорологічні дані з коротким інтервалом усереднення. Зважаючи на важливість отримання найбільш адекватних оцінок для прогнозування надійності зв'язку, МСЕ рекомендує враховувати мікрокліматичні особливості регіонів, що розглядаються, шляхом експериментального накопичення сезонної та річної статистики загасання атмосфери з коротким інтервалом усереднення (близько 1 хвилина). Довготривалі цикли подібного роду експериментальних досліджень вже проведені або проводяться в ряді країн світу.

Такі експериментальні дані щодо кумулятивних функцій питомого горизонтального ослаблення атмосфери відсутні в СМ та ММ ДХ на території України. Також не існує метеорологічних даних, необхідних для адекватного обчислення статистики ослаблення радіохвиль, таких як часовий розподіл інтенсивності дощів з коротким часовим інтервалом усереднення.

Вихідні дані для побудови експериментально обґрунтованих функцій кумулятивного розподілу поверхневого специфічного загасання СМ та ММ ДХ можна отримати таким чином:

- експериментально, шляхом збору тривалої статистики безперервних змін горизонтального питомого загасання атмосфери на приземних шляхах "точка-точка" [5];

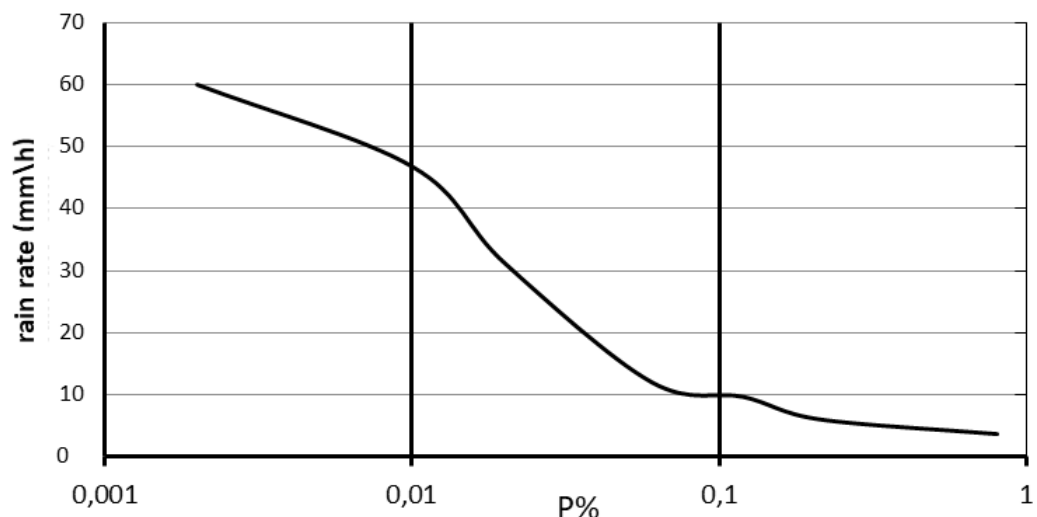
- шляхом обчислення, на основі експериментальних даних про тимчасовий розподіл дощу за допомогою радіофізичних моделей, адекватно пов'язуючи інтенсивність дощу з величиною питомого ослаблення в конкретному діапазоні довжин хвиль.

Незважаючи на те, що перший шлях вважається більш кращим з точки зору точності зроблених оцінок, його суттєвим недоліком є відносна складність підготовки та реалізації такої довгострокової програми безперервних радіофізичних спостережень «точка-точка». Дослідження довгострокових даних показали, що, як правило, придатний для практичного використання період постійного накопичення таких даних становить 3–7 років [11].

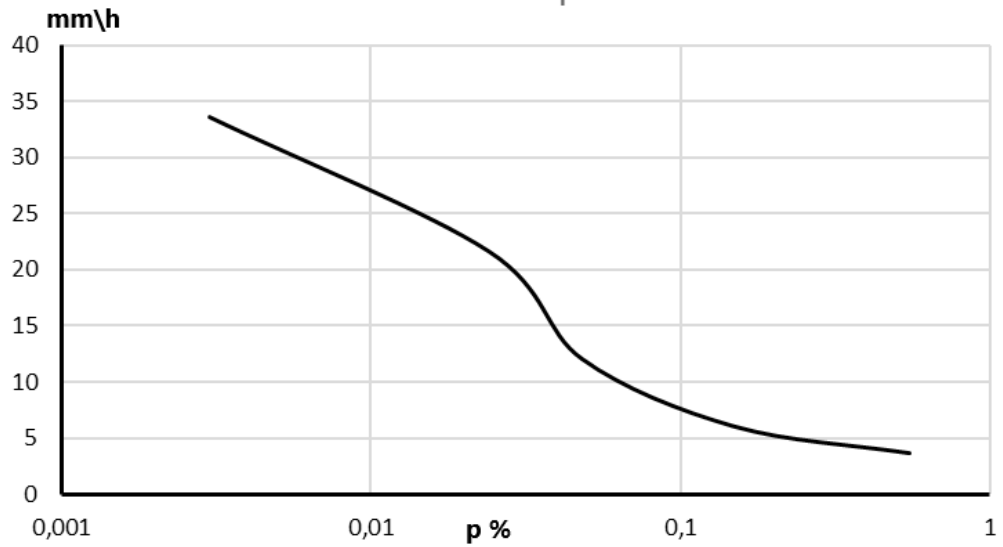
До переваг другого підходу, який широко використовується у світі, є наявність довгострокових баз даних, що містять інтенсивність опадів у розгалуженій мережі метеостанцій, а також наявність радіофізичних моделей, які точно описують кількість ослаблення для різної інтенсивності дощу в різних діапазонах радіохвиль (зазвичай, від 5% в області 10 ГГц до 30% при частотах близько 1000 ГГц). До недоліків такого підходу можна віднести той факт, що в переважній більшості довгострокових баз даних інтенсивність дощу представлена із середнім часом (T) від 20 до 60 хвилин. У той же час значно коротші періоди усереднення інтенсивності дощу були визнані найбільш підходящими для розрахунку ослаблення на шосе.

## РЕЗУЛЬТАТ

На рисунку 3.5 1 показано ймовірність перевищення значень інтенсивності дощу (які побудовані на осі абсцис), отриманих нами на основі метеорологічних спостережень (з 5-хвилинним інтервалом інтеграції) протягом 4 теплих місяців 2018 та 2019 років.



а) 2018

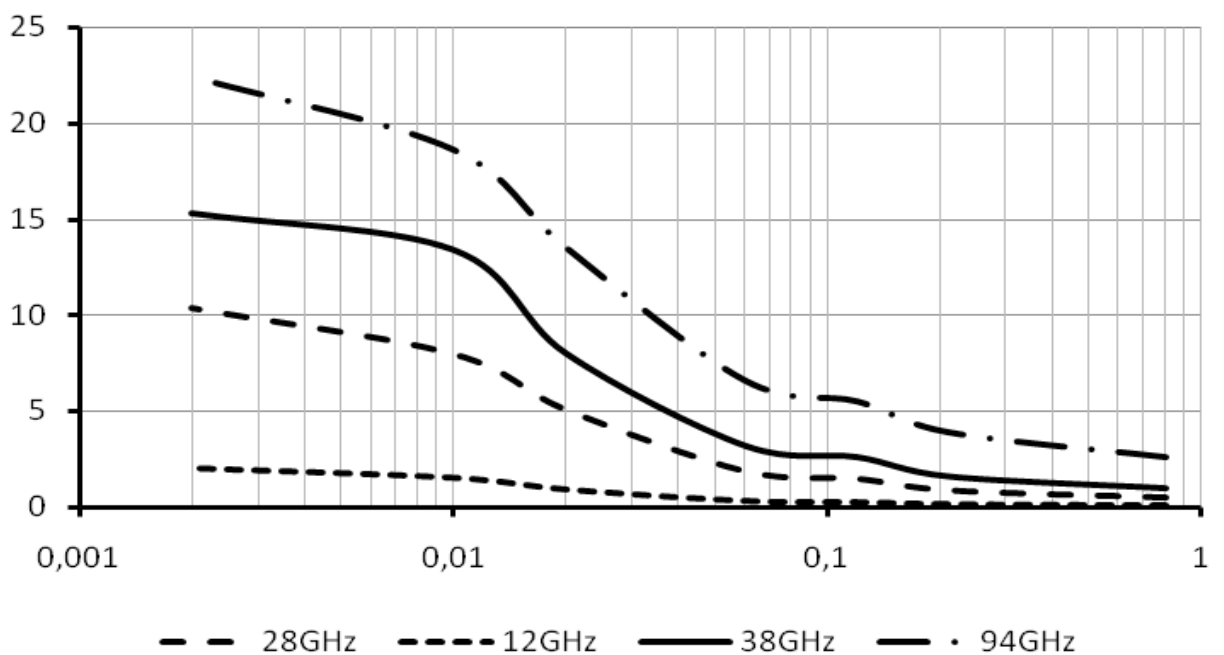


б) 2019

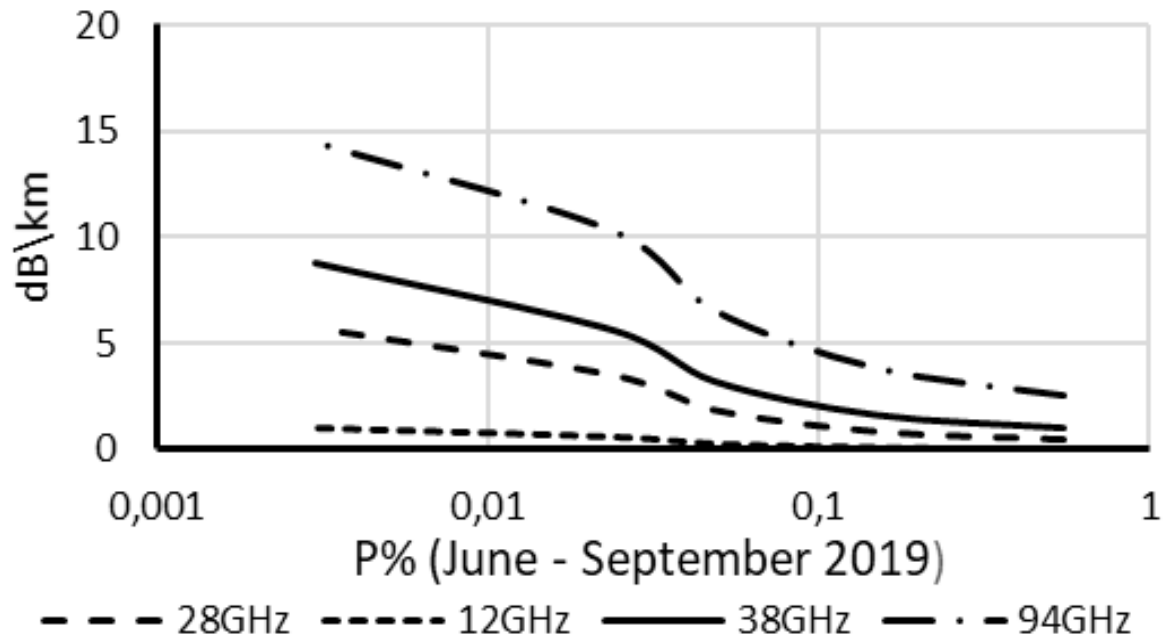
Рисунок. 3.5 - Кумулятивний розподіл інтенсивності дощу за 4-місячний період (червень-вересень) 2018 (а) та 2019 (б) Харків (50 Н, 36 Е), Україна.

Розрахунки ослаблення атмосфери для частот 12 ГГц, 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц були засновані на цих метеорологічних даних.

На рис. 3.6 наведені розраховані залежності кумулятивного розподілу ймовірностей питомого ослаблення атмосфери для різних частот за 4-місячний період 2018 та 2019 (червень-вересень)



а) 2018



б) 2019

Рисунок 3.6 - Сукупний розподіл питомого загасання атмосфери за 4-місячний період 2018 та 2019 (червень-вересень)

На рис. 3.7 наведені розраховані залежності кумулятивного розподілу ймовірності питомого загасання атмосфери для різних частот у липні 2018 року та липні 2019 року, а на рис. 3.8 - червні.

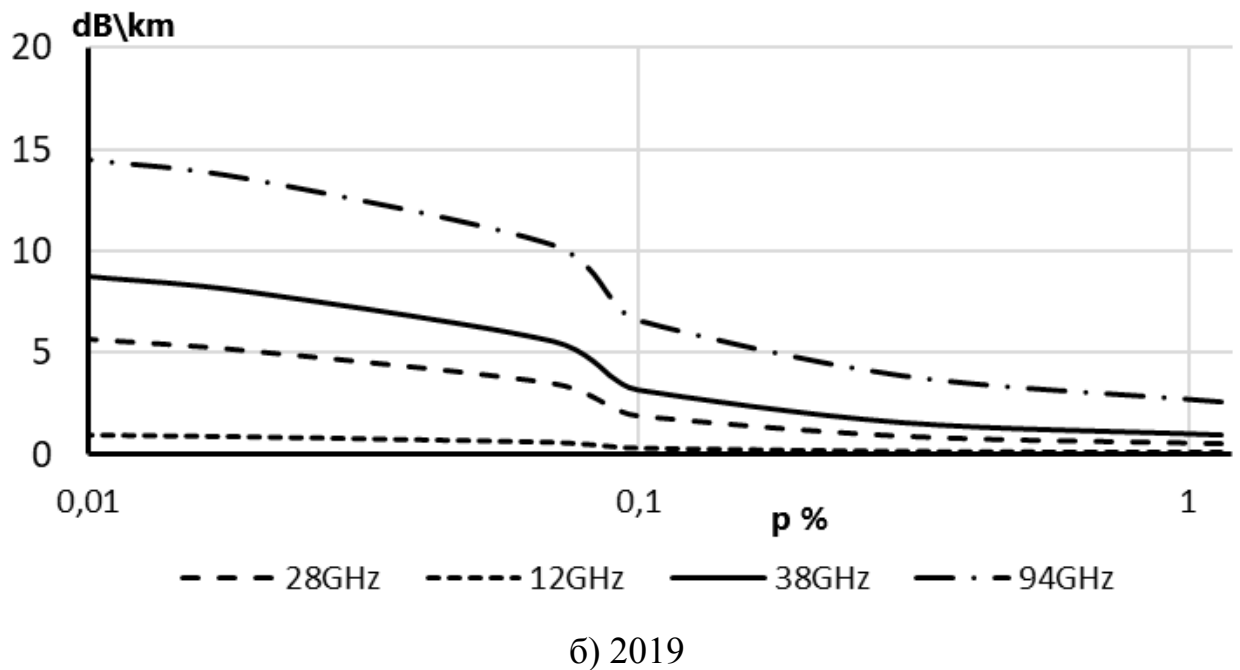
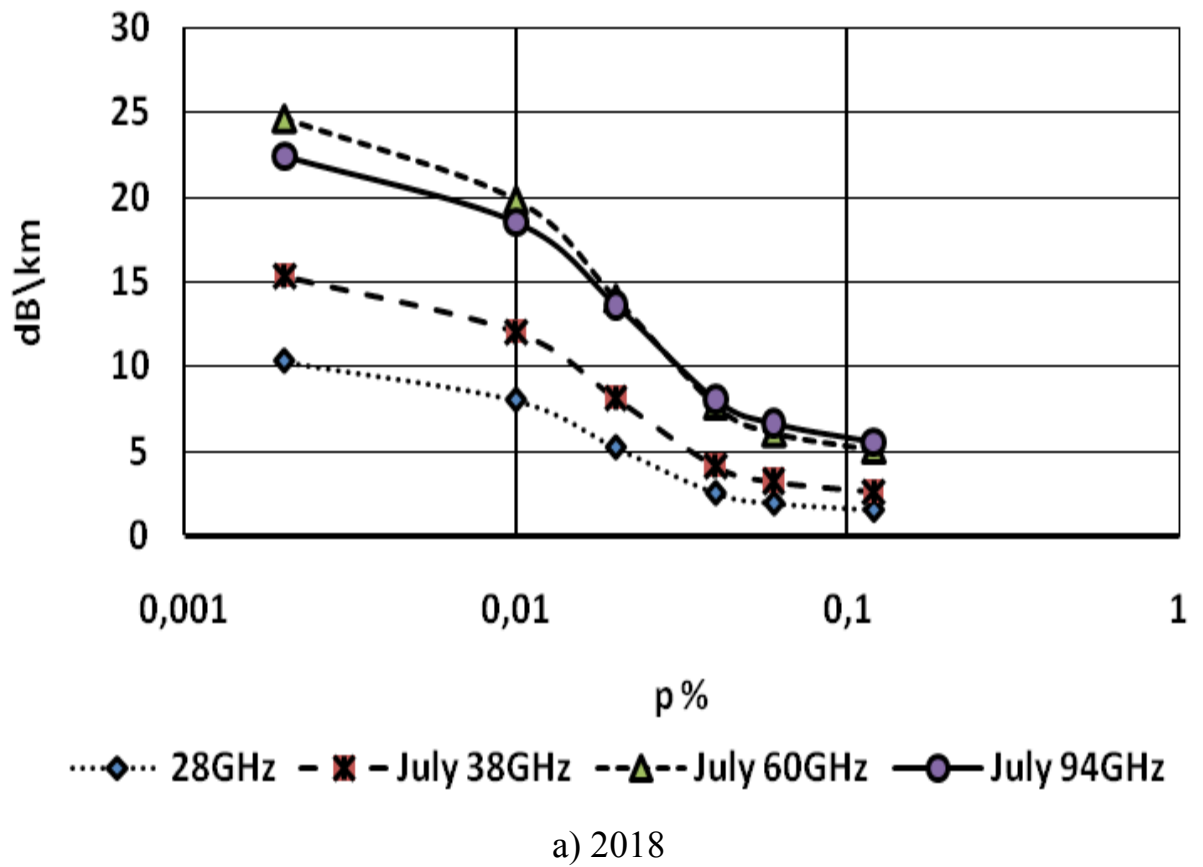
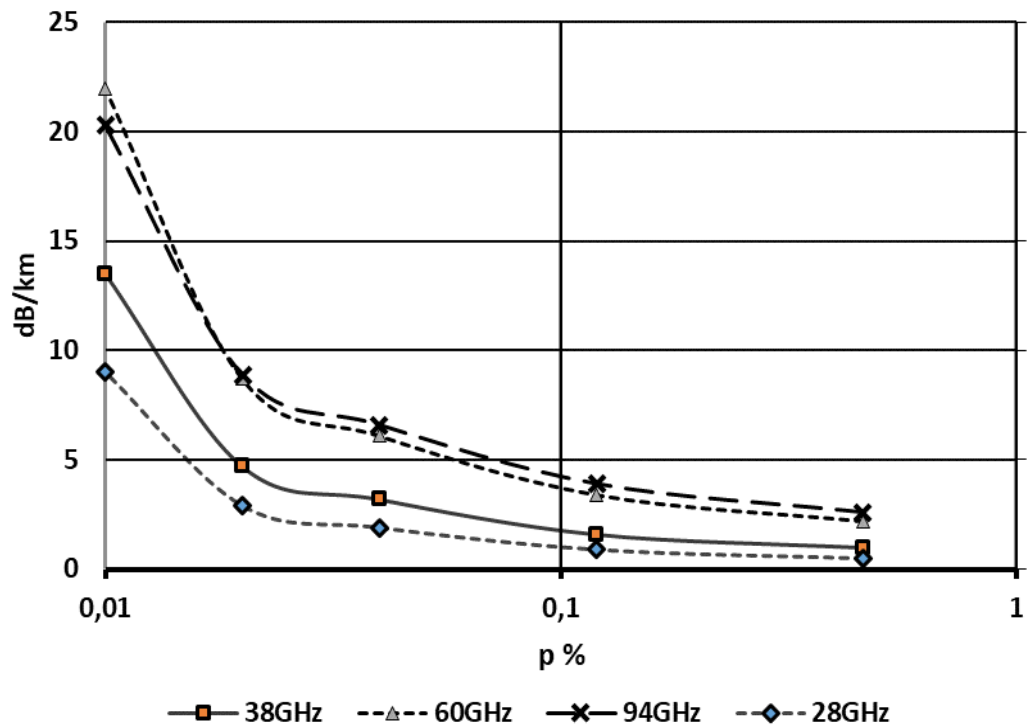
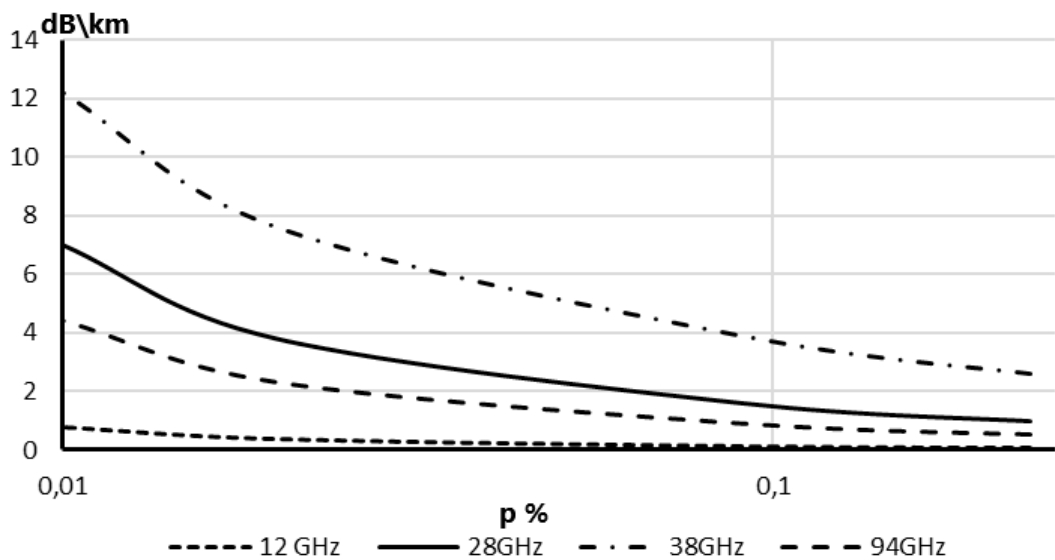


Рисунок 3.7 - Кумулятивний розподіл питомого загасання атмосфери для частот 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц (липень)



а) 2018



б) 2019

Рисунок 3.8 - Кумулятивний розподіл питомого загасання атмосфери для частот 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц (червень)

Наведені на рисунках дані дозволяють кількісно оцінити ймовірність перевищення значень питомого атмосферного ослаблення за вказаний 4-місячний період та щомісяця. Аналіз результатів дозволяє відзначити, що найбільш

несприятливим місяцем у році для заявок на зв'язок є липень. При цьому відмінності помітні за ці два роки у червні та липні. Вони характеризуються меншою кількістю опадів у 2019 році, ніж у 2018 році у ці місяці. Відмінності були ще помітнішими протягом наступних двох місяців. Так, якщо у серпні та вересні 2018 року значення питомого загасання є аналогічними та значно меншими, ніж у червні чи липні, то у серпні 2019 року не було сильних опадів понад 4 мм \ год (загасання менше 3 дБ \ км з  $p = 0,01\%$  на всі розглянуті частоти), а у вересні опади та ослаблення були на рівні червня цього року.

Для обох років було характерно, що значення загасання атмосфери для  $p = 0,01\%$  були меншими ніж 15 дБ \ км для всіх частот, що не перевищували 38 ГГц, і для будь-яких періодів врахування. Тобто, якщо ви вибрали 15 дБ \ км як поріг відключення зв'язку, то принаймні на 2018 та 2019 роки зв'язок можна вважати надійним (з вірогідністю відключення менше 0,01%) на всіх частотах, нижчих від 40 ГГц. Відповідно, слід очікувати навіть нижчих ймовірностей надзвичайно високих значень специфічного ослаблення протягом року спостереження. Однак якщо ми розглянемо проблеми зв'язку в найгірші місяці (червень та липень), то для кожного з них окремо ослаблення на 60 ГГц та 94 ГГц з ймовірністю 0,01% перевищить зазначене вище (15 дБ \ км) поріг збою зв'язку. Спостережуване несподіване перевищення загасання на частоті 60 ГГц порівняно з 94 ГГц, мабуть, пов'язане з резонансними ефектами для дощів високої інтенсивності, які спричинені співмірністю розміру крапель з довжиною хвилі. 5 мм.

Питання тривалості подій опадів, що спричиняють перебої в комунікаціях, та їх міжрічна мінливість, а також питання достатності МСЕ та інших формул для перетворення даних Т-хвилин на 1-хвилинні дані про швидкість дощу \ 13 \ у розглянутий регіон України заслуговує на додаткові додаткові дослідження для високочастотних мереж зв'язку тропосфери.

## ВИСНОВКИ

В Дипломній роботі було розглянуто вплив опадів на канали зв'язку міліметрового діапазону. Побудовано залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі «точка-точка» (Backhaul link) 60 ГГц для трьох кліматичних зон України

Наводяться дані дворічних спостережень інтенсивності дощу в теплий (найгірший) період року, отримані з інтервалом усереднення 5 хв для одного з найбільш населених, промислових та інфраструктурно розвинених регіонів України (Харків). Експериментально обґрунтовані оцінки ймовірності відключення трапосферної комунікації для апіорі заданого порогу внаслідок проявів критичної швидкості дощу можуть бути зроблені на їх основі. Оцінки метеорологічних ситуацій, характерних для перерв зв'язку в різних діапазонах довжин хвиль, визначалися за найгірший місяць та за 4 місяці теплого періоду року за допомогою радіофізичної моделі MPM.

Звертає увагу той факт, що при проектуванні комунікацій слід враховувати умови протягом місяців, коли ймовірність та тривалість відключень максимальні.

Дані, представлені в цьому дослідженні та вищезазначені висновки, можуть бути корисними для формування загальної стратегії підвищення надійності та розбудови інфраструктури перспективних мереж зв'язку.

Нові отримані дані про ймовірність швидкості дощу, проаналізовані в роботі, дозволяють вперше одному з регіонів України дати обґрунтовану кількісну оцінку ймовірності та тривалості подій відключення в розроблених комунікаційних зв'язках.

Подальше вивчення статистики ослаблення радіохвиль ММ діапазону в атмосфері планується протягом декількох річних циклів безперервних вимірювань з 1 хв. інтервал інтеграції даних радіофізичних та метеорологічних спостережень у різних довжинах хвиль.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Paul Tattelman, Kevin P. Larson Effects of Rain Attenuation on Satellite EHF Communications in the United States \ AFGL-TR-89-0012N Environmental Research Papers, NO. 1017 Atmospheric sciences division project 6670 Air force geophysics laboratory hanscom AFB, MA 01731, 1989, 179 pp.
2. Crane, R. K., Electromagnetic Wave Propagation Through Rain, Wiley Interscience, New York, 1996.
3. International Telecommunications Union, Radiocommunications Sector. Recommendation 618-9: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Geneva. 2007. pp. 23.
4. ITU-R: Characteristics of Precipitation for Propagation Modeling, Recommendation P.837-4. ITU-R Recommendations, P Series, International Telecommunications Union, Geneva, 2003.
5. Boncho G. Bonev, Kliment N. Angelov and Emil S. Altimirski Study on Radio Link Availability in Millimeter Wave Range // World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol:5 2011, p.626-629.
6. Ivanov V. K., Leonidov V. I., Maleshenko Yu.I., Pavlikov V. V., Ruzhentsev N. V., Tsopa A. I., Zarudniy A. A. The project of joint investigations of mm waves propagations for ukrainian advanced 5G communication lines // Proc. of Int. Kharkov Symposium - Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), June 21-24, Kharkov, Ukrain, 2016, 4pp. ISBN:978-1-5090-2266-3; IEEE Catalog Number:CFP16780-CDR
7. N.V. Ruzhentsev "Compact 3mm wave band transceivers for technological radars and radiotelephone communication systems", Turkish Journal of Physics, vol.20, N4, 1996, pp.356-358.
8. V. V. Pavlikov, N. V. Ruzhentsev, A. D. Sobkolov, A. I. Tsopa and D. S. Sal'nikov, "Millimeter-range radiometric system for perspective problems of meteorology and

telecommunication," 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kiev, 2017, pp. 46-51. doi: 10.1109/ICATT.2017.7972583

10. Ruzhentsev N.V. and Churilov V.P. Terrain radiation - measurement investigation at 3-mm wave band //International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1996,v.17, N 2, p. 433-449.

11. N. V. Ruzhentsev Peculiarities of vertical atmosphere absorption in the millimeter wave band // Radio Science, v. 38, N 3, 2003, 8043, pp.Mar 8-1 – 8-7, doi:10.1029/2002RS002668

12. ITU-R: Characteristics of Precipitation for Propagation Modeling, Recommendation P.837-5. ITU-R Recommendations, P Series, International Telecommunications Union, Geneva, 2007

13. H.J. Liebe, "MPM – an atmospheric millimeter waves propagation model," International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, vol.10, no 6, pp. 631-650.

14. Luis Emiliani<sup>1</sup>, Lorenzo Luini Evaluation of models for the conversion of T-min rainfall distributions to an equivalent one-minutedistributionto be used in Colombia \\ Rev. Fac. Ing. Univ.Antioquia N 56, pp. 99-119, Diciembre, 2010

15. Talukdar R, Saikia M. Evolution and Innovation in 5G Cellular Communication System and Beyond: A Study [J]. Computer Science, 2014.

16. Elkashlan M, Duong T Q, Chen H H. Millimeter-wave communications for 5G: fundamentals: Part I [Guest Editorial] [J]. Communications Magazine IEEE, 2014, 52(9):52-54.

17. Elkashlan M, Duong T Q, Chen H H. Millimeter-wave communications for 5G – Part 2: applications [Guest Editorial] [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1):166-167.

18. Boccardi F, Heath R W, Lozano A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 52(2):74-80.

19. Tsopa O.I. Prediction model of energy security for the systems of subscriber radio access with branched street and corridor communications channels / A. A. Strel'nitskiy, A. E. Strel'nitskiy, O. I. Tsopa and V. M. Shokalo // Radioelectronics and Communications Systems. – Allerton Press, Inc., 2011. – Vol. 54. – No. 2, – pp. 61-67.

20. Tai Huang. Feasibility Study of IEEE 802.11ad for Vehicle-to-X Communication. Chalmers University of Technology, 2015.
21. Sanjib Sur, Vignesh Venkateswaran, Xinyu Zhang, and Parmesh Ramanathan. 60 GHz Indoor Networking Through Flexible Beams: A Link-Level Profiling. SIGMETRICS Perform. Eval. Rev., 43(1):71–84, June 2015.
22. Nitsche T., Cordeiro C., Flores A. B., Knightly E. W., Perahia E. and Widmer J. C. IEEE 802.11ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – vol. 52, № 12, – pp. 132–141.
23. Yang N., Wang L., Geraci G., Elkashlan M., Yuan J. and Renzo M. D. Safeguarding 5G wireless communication networks using physical layer security. // IEEE Communications Magazine, – 2015. – vol. 53, №4. – pp. 20–27.
24. Steinmetzer D., Chen J., Classen J., Knightly E., Hollick M. Eavesdropping with Periscopes: Experimental Security Analysis of Highly Directional Millimeter Waves // Proceedings of the IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS). – 2015, September 2015, Florence.