НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Радіотехнічний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 621.396

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Є.А. Нелін
(підпис) (ініціали, прізвище)
"12" 12 2018 р.

Магістерська дисертація

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
за спеціалізацією Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки
(код і назва спеціальності)

на тему: Радіометричний метод визначення рівня завад в каналі зв'язку міліметрового діапазону

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи РІ-71мп
(шифр групи)

Зінченко Олександр Васильович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доц. Перегудов С.М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з охорони праці к.т.н., доцент Каштанов С.Ф. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент к.т.н., доцент Бичковський В.О. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

Зінченко О.В. РІ-71мп, 2018

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Факультет (інститут) радіотехнічний факультет
(повна назва)

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою
За спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
За спеціалізацією Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки (код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Є. А. Нелін
(підпис) (ініціали, прізвище)
« 30 » вересня 2017р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Зінченку Олександру Васильовичу
прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Радіометричний метод визначення рівня завад в каналі зв'язку міліметрового діапазону

науковий керівник дисертації к.т.н., доц., Перегудов С.М. ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 6 » 11 2018 р. №4093с

2. Строк подання студентом дисертації 14.12.18

3. Об'єкт дослідження радіоканал зв'язку мм-діапазону довжин хвиль.

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) рівень завад в радіоканалі зв'язку мм-діапазону.

ЗІНЧЕНКО О. В. РІ-71мп, 2018

5. Перелік завдань, які потрібно розробити модель поширення сигналів у радіоканалі зв'язку мм - діапазону; радіометричний метод визначення рівня завад у каналі мм-діапазону.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу спектр сигналу, вимірянний радіометричною системою

7. Орієнтовний перелік публікацій виступ на конференції, стаття

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
З охорони праці	Каштанов С.Ф., доцент		

9. Дата видачі завдання 30 вересня 2017 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Підбір джерел за темою дисертації	10.2017	
2	Аналітичний огляд інф. джерел	12.2017	
3	Розробка ТЗ	06.2018	
4	Розробка радіометричного методу	10.2018	
5	Комп'ютерне моделювання	11.2018	
6	Оформлення магістерської дисертації	12.2018	

Студент _____ (підпис) Зінченко О.В (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації _____ (підпис) Пірогов С.М. (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 107 с., 29 рис., 28 табл., 3 додатки, 46 джерел

Актуальність теми зумовлена активною розробкою стандартів та технологій передачі сигналів мобільного зв’язку п’ятого покоління (5G) та необхідності їх дослідження.

Метою роботи є дослідження можливості застосування радіометричного методу для визначення рівня завад у каналі зв’язку міліметрового діапазону.

Для досягнення поставленої мети розв’язуються такі завдання: провести аналітичний огляд інформаційних джерел за темою дисертації; дослідити можливість використання радіометричного методу для визначення рівня завад у каналу зв'язку мм-діапазону; розробити радіометричного метод дослідження рівня завад в каналі зв'язку міліметрового діапазону; провести експериментальну перевірку розробленого методу та за результатами експериментальних даних прийняти рішення про доцільність його застосування.

Об’єктом дослідження є радіоканал зв'язку мм-діапазону довжин хвиль.

Предметом дослідження є рівень завад в радіоканалі зв'язку мм-діапазону.

Методами дослідження є методи математичного аналізу – для вибору моделі радіоканалу, та математичної статистики – для обробки результатів вимірювань; експериментальні методи досліджень із використанням радіометричної апаратури; методи комп’ютерного моделювання із застосуванням Matlab 2018 – для визначення характеристик сигналів та рівня завад.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у застосуванні радіометричних методів вимірювань для дослідження спектральних характеристик сигналів у каналі зв’язку мм-діапазону.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано радіометричний метод визначення рівня завад в каналі мм-діапазону, які в порівнянні з відомими є більш простим і може використовуватися при проектуванні та експлуатації мереж зв’язку.

Ключові слова: радіометричний метод, канал зв'язку міліметрового діапазону, рівень завад, 5G.

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

ABSTRACT

Master's dissertation: 107 pages, 29 figures, 28 tables, 3 attachments, 46 sources

The urgency of the topic is due to the active development of standards and technologies for the transfer of 5-generation mobile communication signals (5G) and the need for their research.

The purpose of this work is to study the possibility of using a radiometric method to determine the level of noise in the millimeter range communication channel.

To achieve this goal, the following tasks are solved: to conduct an analytical review of information sources on the topic of the dissertation; to investigate the possibility of using the radiometric method to determine the level of noise in the mm-band communication channel; to develop a radiometric method for investigating the level of noise in the millimeter range communication channel; carry out an experimental verification of the developed method and, based on experimental data, decide on the feasibility of its application.

The object of research is the radio channel of the mm-band of wavelengths.

The subject of the study is the level of interference in the radio channel of the mm-band.

Methods of research are methods of mathematical analysis - for choosing a radio channel model, and mathematical statistics - for processing measurement results; experimental research methods using radiometric equipment; Computer simulation methods using Matlab 2018 - to determine the characteristics of the signals and the level of noise.

The scientific novelty of the obtained results consists in the use of radiometric measurement methods for studying the spectral characteristics of the signals in the mm-band communication channel.

The practical value of the results. A radiometric method for determining the level of noise in the mm-band channel is proposed, which is simpler than the known and can be used in the design and operation of communication networks.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

Key words: radiometric method, millimeter range communication channel, noise level, 5G.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ 1

ABSTRACT 2

ЗМІСТ 4

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ 7

ВСТУП 8

1 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛУ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ 10

1.1 Особливості передачі даних у радіомережах 10

1.2 Основні характеристики радіоканалу 16

1.3 Методи та засоби визначення основних параметрів радіоканалу мм-діапазону 20

1.4 Радіометричні методи вимірювання широкосмугових сигналів 28

2 РОЗРОБКА ТА ОБГРУНТУВАННЯ РАДІОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ЗАВАД В КАНАЛІ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ 38

2.1 Аналіз методів передачі сигналів у радіомережах міліметрового діапазону 39

2.2 Дослідження енергетичного спектру основних типів завад у радіоканалі 49

2.3 Основні принципи та технічна реалізація розробленого методу 57

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ РАДІОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ 61

3.1 Комп'ютерне моделювання спектрів сигналів та завад та визначення характеристик радіоканалу 61

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

3.2 Оцінка точності вимірювання параметрів завади радіометричним методом 65

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦіях 73

4.1 Визначення основних потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів при виконанні науково-дослідницької роботи ... 73

4.2 Технічні рішення та організаційні заходи із гігієни праці, виробничої санітарії та техніки безпеки 74

4.2.1 Електробезпека 74

4.2.2 Розрахунок захисного відключення електромережі при аварійном режимі роботи електрообладнання 76

4.2.3 Вимоги до організації безпечних та комфортних умов праці на робочих місцях користувачів ВДТ ПЕОМ 77

4.2.4 Мікроклімат робочої зони 78

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях 79

4.3.1 Вимоги щодо організації ефективної роботи систем оповіщення персоналу у разі виникнення небезпечної ситуації 79

4.3.2 Обов’язки та дії персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації. 81

4.3.3 Пожежна безпека 81

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ 83

5.1 Опис ідеї проекту 83

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту 84

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту 85

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту 89

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту 90

ВИСНОВКИ 94

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ..... 95
ДОДАТОК А ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ..... 100
ДОДАТОК Б ПУБЛІКАЦІЇ..... 105
ДОДАТОК В ПРОГРАМНИЙ КОД MATLAB..... 107

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БС – базова станція мобільного зв’язку;

ЕМВ – електромагнітне випромінювання;

МТ – мобільний термінал;

НВЧ – надвисокочастотний;

ПК – персональний комп’ютер;

РС – радіометрична система;

СЩП – спектральна щільність потужності;

СЩПШ – спектральна щільність потужності шуму;

OFDM – orthogonal frequency division multiplexing (мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів)

WLAN – wireless local area network (бездротова локальна мережа)

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

ВСТУП

Наразі відбувається активне обговорення та розробка стандартів передачі даних за технологіями 5G.

Основною вимогою для каналів передачі даних п’ятого покоління є висока швидкість передачі даних (до 1 Гбіт/с [11]). За теоремою Шенона швидкість передачі даних у радіоканалі залежить від співвідношення сигнал/шум. Тому для проектування систем зв’язку 5G вкрай необхідно мати можливість моніторити рівень завад на вході приймальних антен. Наразі із запропонованих на ринку рішень наявні лише надзвичайно дорогі аналізатори спектру, що можуть досліджувати сигнали мм-діапазону. Проте даний метод дослідження є зручним для використання лише в лабораторних умовах при високому рівні корисного сигналу. В даній роботі запропоновано використовувати радіометричний метод для дослідження рівня завад в каналі мм-діапазону, що дозволяє досліджувати сигнали мм-діапазону з високим рівнем завад.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи пов’язана з планами наукових досліджень, що проводяться на кафедрі радіоконструювання та виробництва радіоапаратури КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка радіометричного методу оцінки рівня завад в канал зв’язку мм-діапазону.

Для досягнення поставленої мети розв’язуються такі завдання:

- провести аналіз процесів створення завад різних типів у радіоканалі (групової, інтерференційні спотворення, міжсимвольна інтерференція та ін.), оцінити їх вплив на пропускну здатність радіоканалу мм-діапазону та визначити основні типи завад;
- обґрунтувати та розробити радіометричний метод визначення рівня завад у каналі зв’язку мм-діапазону;

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

- провести комп’ютерне моделювання розподілу потужності у частотному спектрі завад в середовищі пакету MatLab 2018b з розширенням 5G Toolbox;
- за результатами даних експерименту оцінити можливість застосування радіометричного методу та правильність запропонованої моделі, для визначення рівня завад у каналі зв’язку мм-діапазону.

Об’єктом дослідження є радіоканал зв'язку мм-діапазону довжин хвиль.

Предметом дослідження є рівень завад в радіоканалі зв'язку мм-діапазону.

Методами дослідження є методи математичного аналізу – для розроблення моделі, та математичної статистики – для обробки результатів вимірювань; експериментальні методи досліджень з використанням радіометричної апаратури – для визначення характеристик каналу зв'язку мм-діапазону.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у застосуванні радіометричних методів вимірювань для дослідження спектральних характеристик сигналів у каналі зв’язку мм-діапазону.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано радіометричний метод визначення рівня завад в каналі мм-діапазону, які в порівнянні з відомими є більш простим і може використовуватися при проектуванні та експлуатації мереж зв’язку.

Особистий внесок магістранта. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, що опубліковані у співавторстві магістранту належить: розробка радіометричного метод оцінки характеристик каналу зв'язку міліметрового діапазону.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи представлені у доповіді на І Всеукраїнській науково-технічної конференції «Комп’ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (2018 р.), м. Житомир.

Публікації та конференції. За матеріалами дисертації опубліковані тези доповіді у збірнику матеріалів І Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп’ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (2018 р.), м. Житомир.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

1 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛУ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

Широке застосування радіозв'язку у багатьох сферах людської діяльності є характерною рисою сучасного світу. Останніми роками спостерігається тенденція відмови від стаціонарних телекомунікаційних мереж. Мобільний зв'язок став однією з найбільш успішних інноваційних технологій сучасності. Поєднання технологічності та доступної ціни на послуги, включаючи доступ до глобальної мережі Інтернет зробили мобільний зв'язок невід'ємною частиною життя більшості населення планети. Сьогодні обсяг інформації, що поширюється через телекомунікаційні мережі безпрецедентно зростає завдяки використанню смартфонів та інших мобільних пристроїв передачі даних.

Згідно з прогнозами, показник середньорічного темпу зростання мобільного трафіку CAGR (Compound Annual Growth Rate) складає 108%, а в цілому за наступні 10 років він виросте тисячократно [1]. З іншого боку розвиток власне глобальної мережі Інтернет, використання її можливостей у народному господарстві та побуті потребує мобільного доступу до неї та розробки бездротових мереж. На теперішній час найбільшу перевагу серед них мають радіомережі. Це пояснюється зручністю їх використання, відносно низькою вартістю та пропускною здатністю каналу зв'язку, яка визначається робочою смугою частот. Враховуючи поточну динаміку розвитку інформаційних технологій, можна вважати, що радіомережі стануть найбільш поширеними. Проте стрімке зростання швидкості передачі даних потребує використання нових, як правило, більш високочастотних ділянок радіодіапазону.

1.1 Особливості передачі даних у радіомережах

Радіомережі як різновид бездротових мереж забезпечують передачу інформаційних сигналів, коли використання традиційних кабельних технологій ускладнено або недоцільно.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

Яскравим прикладом цього є телефонний та мобільний зв'язок. Історія розвитку мобільного радіозв'язку складається з таких етапів, що характеризуються поколіннями застосованої апаратури.

- Перше покоління (1G) представляло аналогові системи передачі мовної інформації, до складу яких входили стаціонарні базові станції (БС) та мобільні термінал (МТ);
- друге покоління (2G) — цифрові системи телефонного зв'язку;
- третє покоління (3G) — подальший розвиток таких цифрових систем, що забезпечило розширення переліку різноманітних послуг і, у першу чергу, мобільний доступ до мережі Інтернет зі швидкістю передачі даних понад 200 Кбіт/с [2];
- четверте покоління (4G) забезпечило ще більші швидкості передачі інформації (до 100 Мбіт \ с. для високомобільних абонентів і 1 Гбіт\с. для стаціонарних терміналів). Окрім того основна відмінність мереж четвертого покоління від третього полягає в тому, що технологія 4G повністю заснована на протоколах пакетної передачі даних і використання технології ортогонального частотного ущільнення;

У даний час завершується перехід до наступного етапу розвитку мобільних мереж, яке передбачає забезпечення гігабітних швидкостей передачі даних, що вимагає крім розширення смуги робочих частот радіоканалу також застосування неліцензійних ділянок частотного ресурсу та перехід до міліметрового діапазону довжин хвиль.

Всі покоління рухомого зв'язку мають стільникову структуру, яка дозволяє багатократно використовувати виділений частотний ресурс і збільшити ємність телекомунікаційних мереж у порівнянні, наприклад, з мережами радіальної структури без погіршення якості зв'язку.

Отже основним елементом топології мережі є стільник. Наступна структурна одиниця — кластер: сукупність сусідніх стільників, що використовують різні робочі частоти або набори частот. Рис. 1.1 ілюструє кластерну структуру мережі.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

Розмірність кластера K визначається числом стільників, що його складають. Кластери створюють періодичну структуру.

Загальна кількість частотних каналів, яка виділена для певної стільникової мережі, розподіляється між комірками кластера. Такий розподіл повторюється від кластера до кластера, що рівномірно заповнюють усі зону покриття. Саме введення кластерної структури дозволяє організувати множину варіантів сукупності фіксованих радіочастот.

а *б*

Рисунок 1.1 — Періодичні структури 3-елементного (*а*) та 4-елементного кластерів стільникового зв’язку

Багатократне використовування одних і тих же робочих частот у мережі спричиняє виникнення взаємних внутрішньосистемних завад. Відомі методи щодо усунення впливу таких завад на якість зв’язку [6], проте стрімке зростання кількості абонентів у мережі, і відповідно, мобільних передавачів та вимоги до підвищення швидкості передачі даних потрібують вдосконалення існуючих та розробки нових методів.

Бездротові мережі міліметрового діапазону

Стандарт IEEE 802.11ad [3] передбачає використання ділянок мм-діапазону для побудови радіомереж п’ятого покоління. Зокрема, передача в діапазоні 60 ГГц є досить новою концепцією бездротового зв'язку, яка націлена на використання неліцензованому смуги частот шириною 7 ГГц в цьому діапазоні [4]. Деякі особ-

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

ливості цієї технології викликали великий інтерес в галузі. Основною перевагою цієї високочастотної технології полягає в забезпеченні високої швидкості передачі даних і вирішенні завдань зв'язку на невеликій відстані, таких як передача даних і незжатих аудіо- і відеосигналів. На відстані до 10 метрів можлива швидкість передачі даних понад 1 Гбіт/с.

Таких високих швидкостей передачі даних можна досягти завдяки безперервному спектру і смузі з меншим обмеженням по потужності в діапазоні 60 ГГц. Крім того, високі втрати при поширенні сигналу забезпечують більший коефіцієнт повторного використання частот всередині приміщень. Крім того, радіохвилі міліметрового діапазону дозволяють використовувати дуже компактні радіоприймачі з безліччю антен, що підтримують технології формування променя і керування променем, що підвищує пропускну здатність каналу, а також забезпечує підтримку зв'язку поза прямої видимості (NLOS).

Альянс за гігабітним бездротових мереж (WiGig) створив першу версію своєї нової специфікації в кінці 2009 року. Потім WiGig спільно з групою IEEE 802.11ad розробили поправки до добре відомої специфікації бездротових локальних мереж IEEE 802.11, щоб додати можливість роботи в діапазоні 60 ГГц. Ці поправки були завершені в 2012 році.

Основою будь-якої бездротової мережі є протокол. Як правило, протокол регламентує топологію мережі, маршрутизацію, адресацію, порядок доступу вузлів мережі до каналу передачі, формат переданих даних, набір керуючих команд для вузлів мережі, а також систему захисту інформації. Усе різноманіття протоколів бездротової передачі даних можна класифікувати різними методами, вибираючи за основний один з параметрів: топологію мережі, швидкість роботи або алгоритми безпеки. Найбільш поширений метод класифікації у технічній літературі — за максимальним радіусом дії бездротової мережі [5]. Крім радіусу дії мережі роль протоколів є важливою для визначення рівнів у моделі OSI., яка розроблена Міжнародною організацією зі стандартів ISO і передбачає 7-рівневу ієрархію (табл. 1.1). Слід відзначити, що багато протоколів розроблено організацією

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

IEEE, причому надані нею рекомендації пов’язані з нижніми — фізичним та канальним рівнями.

Використання методів доступу у таких протоколах обумовлюється необхідністю передавати великі обсяги інформації за короткий проміжок часу, зберігаючи при цьому зв’язок з декількома абонентами у виділених діапазонах частот, тобто реалізуючи множинний доступ до мережі. В протоколах передачі даних передбачено три основні методи розділення доступу пристроїв зв’язку до радіоканалу: FDMA, TDMA та CDMA, які детально описані у літературі (див., наприклад, [6], [8]). Крім того, існує ряд їх модифікацій.

Таблиця 1.1 — Рівні моделі OSI

№	Назва	Дані	Призначення
1	Фізичний	біти	Середовище передачі, сигнали
2	Канальний	кадри	Фізична адресація
3	Мережевий	пакети	Маршрутизація та ведення обліку
4	Транспортний	блоки	Забезпечення коректної наскрізної пересилки даних
5	Сеансовий	дані	Керування сеансом зв’язку, аутентифікація та перевірка повноважень
6	Представлення даних	дані	Інтерпретація та стиснення даних
7	Прикладний	дані	Доступ до мережевих служб, представлення послуг на рівні користувача

FDMA (Frequency Division Multiple Access) — множинний доступ з розділенням каналів за частотою, який передбачає використання радіочастот, коли в одному частотному діапазоні знаходиться тільки один абонент, а різні абоненти стільнику використовують різні частоти. Цей спосіб є застосування частотного мультиплексування (FDM) в радіозв’язку. Поки початковий запит не закінчено, канал для інших сеансів зв’язку закритий. Для дуплексного режиму за методом FDMA потрібно два канали — один для передачі, а інший для приймання. Цей мето використовувався в аналоговому зв’язку 1G.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

TDMA (Time Division Multiple Access) — множинний доступ з розділенням каналів за часом: спосіб використання радіочастот, коли в одному частотному інтервалі знаходиться декілька абонентів, причому для передачі різним абонентам відведено різні часові інтервали (слоти). Це застосування методу часового мультиплексування (TDM) в радіозв'язку. У теперішній час TDMA є домінуючою технологією для мобільних стільникових мереж і використовується, наприклад, у стандарті GSM.

CDMA (Code Division Multiple Access) — це інший метод множинного доступу до радіоканалу, який застосовується у мобільному зв'язку 3G. CDMA є розширенням декількох технологій доступу і використовує унікальну схему кодування, яка дозволяє декільком користувачам одночасно використовувати один радіоканал. Таким чином кожній групі користувачів надається унікальний код, причому не може бути так, щоб в тому ж самому каналі були різні групи з однаковим кодом. Особливістю цієї технології є те, що вона дозволяє збільшити кількість сигналів у заданій смузі частот і забезпечує більш високу швидкість передачі даних.

OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) — ортогональне частотне розділення каналів з мультиплексуванням, яке є цифровою схемою модуляції, що використовує велику кількість поблизу розташованих (за частотою) піднесних. Кожна така піднесна модулюється за звичайною схемою модуляції (наприклад, квадратурна модуляція) на відносно низькій швидкості, зберігаючи загальну швидкість передачі даних такою, як для звичайних схем модуляції з одною несною у тій же смузі пропускання. На практиці сигнали OFDM отримають шляхом ШПФ (швидкого перетворення Фур'є). Вказаний метод широко застосовується в радіомережах 3G та 4G [6, 8], і передбачається його використання в технологіях зв'язку 5G, зокрема у радіомережах мм-діапазону.

При побудові радіомереж особлива увага надається захисту інформації, що через них поширюється. Безпека таких мереж залежить від використання сукупності технологій: шифрування, цифрового підпису, паролів, зміни ключів шифрування тощо [5]. Найбільш поширені алгоритми та методи шифрування для відомих радіомереж розглянуто у праці [5], а детально у спеціальної літературі. Слід

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

зазначити, що одним з основних принципів шифрування є гамування, тобто максимальне усунення статистичного зв'язку між символами початкових даних, що передаються [9].

Враховуючи все вище викладене, можна зробити висновок, що за формою спектру електромагнітні сигнали, що поширюються у каналі зв'язку є шумоподібними, і для визначення їх характеристик, зокрема інтегральних, можна застосовувати методи і засоби статистичної радіотехніки.

1.2 Основні характеристики радіоканалу

На рис. 1.2 представлено схему передачі цифрових даних.

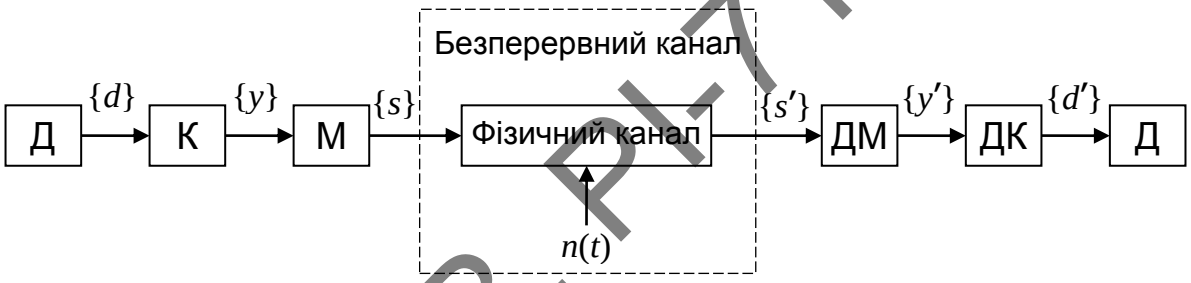


Рисунок 1.2 — Модель каналу передачі інформації [7]

Вихідні дані джерела інформації *Д* $\{d\}$ перетворюються у кодері *К* у послідовність $\{y\}$ кодових символів y_k. У модуляторі *М* кожному елементу y_k ставиться у взаємно однозначну відповідність сигнал $s_k(t)$. Передача послідовності таких сигналів $\{s\}$ здійснюється через фізичний канал, де мають місце їх спотворення завдяки впливу різноманітних шумів та завад $n(t)$.

Тому до входу демодулятора *ДМ* передаються сигнали $\{s'\}$, які є реалізаціями випадкового процесу, що складається з переданих через фізичний канал сигналів $s(t)$ та реалізацій $n(t)$ випадкового процесу, що представляє адитивну заваду у середовищі поширення сигналів. Таким чином, на вході демодулятора маємо сигнал

$$s'(t) = s(t) + n(t), \tag{1.1}$$

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

У даній моделі вводиться поняття безперервного каналу, до якого відносять пристрої випромінювання, приймання та підсилення радіосигналів, а також фізичне середовище їх поширення, у якому діють завади.

До основних характеристик каналу передачі інформації відносяться [2]:

- набір (алфавіт) кодових символів $\{y\}$, за допомогою яких реалізується кодування вихідних даних;
- швидкість передачі символів v (у бодах, тобто кількість символів, переданих через канал за 1 секунду);
- імовірність помилки $p(y_i \mid y_j)$, тобто умовна ймовірність того, що на виході демодулятора появляється символ y_j, тоді як на вході модулятора був символ y_i;
- пропускна здатність C — максимальна кількість інформації, яку можна передати через канал в одиницю часу (біт/с). При цьому максимум визначається для всіх можливих джерел інформації та правил кодування при фіксованих значеннях швидкості v та кількості їх в алфавіті.

Якщо припустити, що випадковий процес створення завад описується розподілом Гауса зі спектральною щільністю потужності шуму (СЩПШ) N_0 у тієї же смузі частот Δf, у якій знаходиться частотний спектр сигналу, то пропускна здатність описується формулою Шеннона

$$C = \Delta f \log_2\left(1 + \frac{P_S}{P_N}\right), \qquad (1.2)$$

де P_S — середня потужність сигналу, а P_N — середня потужність завад.

Формула (1.2) отримана у припущенні статистичної незалежності відлічуваних значень s_i корисного сигналу [7], тобто корисний сигнал є реалізацією нормального випадкового процесу, енергетичний спектр якого рівномірний у смузі частот Δf безперервного каналу, що розглядається у моделі.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

У випадку безперервного каналу із завадами або шумом, що мають нерівномірний енергетичний спектр у смузі частот пропускання каналу, його пропускна здатність буде більше ніж розрахована за формулою (1.2), тобто ця формула відповідає умовам найгіршої адитивної завади [7].

З формули (1.2) видно, пропускна здатність каналу залежить від смуги частот каналу і співвідношення потужностей сигналу та шуму (завади), і характер залежності величини C від вказаних параметрів суттєво різний. Проте навіть нескінченне збільшення смуги Δf не спричиняє нескінченне зростання пропускної здатності. Дійсно, якщо СЩПШ$= N_0$ і $C_\infty = \lim\limits_{\Delta f \to \infty} C$, то

$$C_\infty = \lim_{\Delta f \to \infty}\left[\Delta f \log_2\left(1+\frac{P_S}{N_0 \Delta f}\right)\right] = \log_2 e \cdot \lim_{\Delta f \to \infty}\left[\Delta f \ln\left(1+\frac{P_S}{N_0 \Delta f}\right)\right] \approx$$

$$\approx 1,443 \frac{P_S}{N_0} \text{ (біт/с)}.$$

Графік залежності C/C_∞ від величини $\Delta f \cdot N_0/P_S$ приведено на рис. 1.3.

Для заданої смуги Δf величина C монотонно збільшується зі зростанням значення P_S/P_N. З іншого боку, для передачі будь-якої кількості інформації I_T через безперервний канал за заданий час T величина $h^2 = P_S T/N_0$ має перевищувати певний поріг, що залежить від величини I_T. Оскільки $I_T < C_\infty T$, то $h^2 > I_T/\log_2 e$.

Отже для передачі одного біта інформації за час T_B необхідно затратити енергію $E_B = P_S T_B$, не меншу ніж межа Шеннона

$$E_B/N_0 = 1/\log_2 e \approx 0,693 \approx -1,6 \text{ дБ}. \qquad (1.2)$$

Відомо, що для каналу передачі цифрових даних (див., наприклад, [2]) дискретні дані, які відтворює джерело інформації зі швидкістю (продуктивністю) $H'(d)$ можуть бути передані через канал з пропускною здатністю C, з імовірністю, скільки завгодно близькою до

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

нуля, якщо $H'(d) < C$.

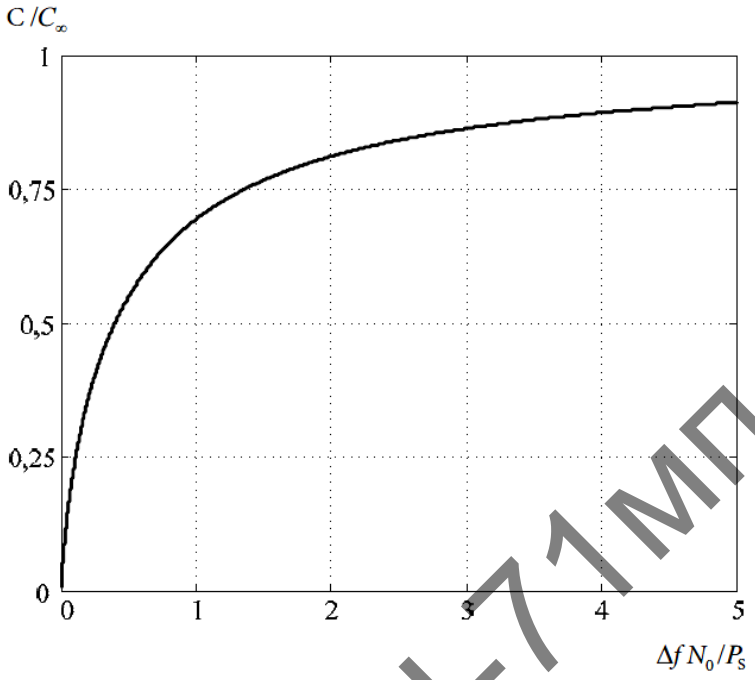


Рисунок 1.3 — Залежність пропускної здатності безперервного каналу від його нормованої смуги [7]

У протилежному випадку така передача не можлива. Таким чином, рівень шуму у безперервному каналі передачі даних є критичним параметром, що визначає не тільки швидкість передачі інформації, а також можливість реалізації самого процесу передачі. У випадку двійкового джерела інформації без надлишковості зі швидкістю передачі W символів за секунду, продуктивність складає $H'(d) = W \log_2 2 = W$ (біт/с), а якість зв'язку характеризується величиною p_B середньої ймовірності помилкового приймання 1 біта переданого (після кодування) повідомлення. Часто вводять поняття інформаційної смуги $\Delta f_B = 1/T_B$ і задають потужність шуму (завад) $P_N^{(B)}$ у смузі Δf_B. У такому разі

$$h_B^2 = \frac{P_S T_B}{N_0} = \frac{P_S}{N_0 \Delta f_B} = \frac{P_S}{P_N^{(B)}},$$

і розглядають питому швидкість передачі інформації γ як відношення реалізованої швидкості передачі даних C' до смуги частот

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

$$\gamma = C'/\Delta f \ \text{(біт/с·Гц)} \qquad (1.3)$$

З врахуванням формули (1.2) для граничного значення швидкості передачі інформації $C' = 1/T_B$ можна отримати характерні співвідношення [7]

$$\gamma = \log_2\left(1 + h_B^2\gamma\right) \text{ и}$$

$$h_B^2 = \frac{2^\gamma - 1}{\gamma}. \qquad (1.4)$$

З формули (1.4) видно, що зменшення енергетичної ефективності $h^2 = P_S T/N_0$, тобто рівню сигналу відносно шуму, спричиняє зменшення спектральної ефективності γ, і відповідно, швидкості передачі інформації.

Таким чином, у процесі подальшого розвитку бездротових мереж, актуальною постає задача удосконалення розробка нових методів і засобів визначення рівню шуму та завад у радіоканалах зв'язку, особливо, при забезпеченні великих швидкостей передачі даних.

1.3 Методи та засоби визначення основних параметрів радіоканалу мм-діапазону

У каналах радіозв'язку діє комплекс завад та спотворень. Для зменшення їх впливу використовуються методи розроблені кодування інформації та передачі сигналів [8]. Проте об'єктивно залишаються джерела шумів та завад, які обмежують пропускну здатність каналів зв'язку сучасних мереж. Наприклад, слід враховувати вплив відбиття хвиль у середовищі поширення, що спричиняє декілька шляхів передачі сигналів, частотно-селективні загасання, зміни несної частоти та зсув фази сигналу через ефект Доплера, а також групову заваду, що створюється іншими користувачами радіомережі. Великі замирання сигналу у середовищі поширення, що є характерним для каналів мм-діапазону, ще більше погіршують якість передачі інформації.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

Традиційним методом підвищення завадостійкості радіомереж є метод рознесення, тобто розділення каналів приймання-передачі між базовими станціями та абонентами. Технічно можна реалізувати рознесення у часі, просторі, по частоті та поляризації хвиль, а також просторове-часове кодування [8]. Найбільш поширеними останніми роками стали методи передачі багаточастотних сигналів, які є набором ортогональних піднесних (OFDM). Проте вдосконалення методів передачі потрібує використання допоміжних сигналів, які у свою чергу можуть збільшувати рівень завад, наприклад, групової або внутрішньосистемної. Отже актуальною є задача оцінки параметрів радіоканалу.

Складність визначення характеристик та параметрів радіомереж, а також тестування їх роботоздатності обумовлені тим, що необхідно, з одного боку, застосовувати методи, притаманні звичайним локальним мережам, а з іншого боку, вимірювальну техніку мікрохвильового діапазону, включаючи мм-діапазон, що планується використовувати у системах зв'язку п'ятого покоління. Все це ускладнює вимірювальний процес та підвищує його вартість. Оскільки організація радіомереж покоління 5G, як і попередніх передбачає доступ до дротових локальних мереж, то методи і засоби діагностики їх роботоздатності та якості обслуговування на мережевому та вищих рівнях за семирівневою моделлю OSI практично не відрізняється від тих, що використовуються для звичайних комп'ютерних мереж [9-12]. Проте параметри і характеристики, що визначаються на цих рівнях суттєво залежать від стану фізичного середовища, через яке передаються інформаційні сигнали. У випадку радіомереж для контролю останнього застосовуються вимірювальні прилади та комплекси мікрохвильового діапазон: аналізатори спектру, скалярні та векторні аналізатори, вимірювачі потужності, частотоміри тощо.

Для визначення частотного розподілу енергії сигналів та завад використовуються, як правило аналізатори спектру. Провідними виробниками апаратури цього класу є *Rohde&Schwarz* [13] *Keysight Technologies* (*Agilent Technologies*, до 2013 р.) [14] та інші.

За допомогою аналізатора спектру можна вирішувати такі задачі:

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

- вимірювання характеристик джерел сигналів в галузі зв’язку та радіолокації завдяки малому власному фазовому шуму;
- вимірювання гармонічних складових вихідного сигналу генераторів завдяки вбудованому фільтру верхніх частот;
- виявлення та аналіз паразитних випромінювань завдяки достатньо великому динамічному діапазону та низькому рівню власних шумів;
- визначення параметрів широкосмугових модульованих сигналів завдяки великій ширині смуги пропускання;
- виявлення спотворень сигналів, які поширюються у радіоканалі, через їх взаємний вплив.

Аналізатори спектру вказаних виробників повністю задовольняють вимогам до апаратури цього класу у зв’язку зі збільшенням пропускної здатності радіоканалів сучасних систем мобільного зв’язку поколінь 4G та 5G, а також вимогам науково-технічних досліджень, що проводяться у телекомунікаційній галузі, зокрема, у мм-діапазоні. Розроблені аналізатори спектру та вимірювальні приймачі дозволяють визначати форму сигналів та шумові характеристики радіоканалу в діапазоні частот від 2 до 85 ГГц.

Наприклад, аналізатор R&S®FSW85 дозволяє вимірювати сигнали у частотному діапазоні 2-85 ГГц з точністю за частотою та амплітудою відповідно 1 кГц та 0,4 дБ. Динамічний діапазон вимірювання амплітуди широкосмугових сигналів дозволяє реєструвати внутрішньосистемні завади до рівню мінус 88 дБ від основного сигналу. Власний шум аналізатора характеризується величиною СЩПШ, яка залежить від частоти (табл. 1.2).

Вимірювальний приймач R&S®FSMR дозволяє визначати параметри сигналів радіомереж стандартів: GSM/EGPRS/EDGE, WCDMA / HSPA / HSPA+, CDMA2000, Bluetooth, ZigBee (IEEE 802.15.4) та інших. Приймач містить високоточний калібратор рівню, що дозволяє вимірювати абсолютне значення потужності сигналів у межах від +30 дБмВт до мінус 140 дБмВт з похибками вимірювання частоти — 1% та амплітуди 0,083 дБ (для частоти 4,2 ГГц).

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

Таблиця 1.2 — Відображуване середнє значення СЩПШ аналізатора спектру R&S®FSW85 [13]

Частота, ГГц	2	8	25	40	48	60
СЩПШ, дБмВт/Гц	–156	–156	–150	–145	–138	
СЩПШ (з передпідсилювачем, опція R&S®FSW-B24), дБмВт/Гц		–169	–164		–154	–152

Аналізатори спектру компанія *Keysight Technologies* мають схожі характеристики. Слід зазначити, що лінійка пристроїв даного виробника перекриває частотний діапазон до 110 ГГц, а зовнішній змішувач дозволяє розширити його до 1,1 ТГц. Проте, похибка вимірювання амплітуди сигналів декілька більша (0,18–0,27 дБ в залежності від типа) [14]. Графічний інтерфейс має такий же вигляд, як і прилади компанії *Rohde&Schwarz* [13].

Компанію *Rohde & Schwarz* на базі аналізаторів спектру розроблено метод вимірювання спектральних характеристик сигналів мм-діапазону, зокрема сигналів систем мобільного зв'язку покоління 5G [13]. Вимірювальний програмно-апаратний комплекс складається з аналізатора спектра, векторного генератора та програмного забезпечення *R&S TS-5GCS* і дозволяє задавати необхідні форми сигналів, а також режими роботи генератора та аналізатора.

До його ключових особливостей можна віднести:

- достатньо великий динамічний діапазон;
- низькі рівні амплітудного та фазового шуму;
- змінну частотну смугу огляду (до 160 МГц);
- високу чутливість, яка визначається рівнем власних шумів аналізатора (див., наприклад, табл. 1.2);
- високу швидкість вимірювань та малий період розгортки (до 1 мс)
- інші додаткові можливості.

Векторний генератор сигналів використовується як джерело сигналу для зондування каналу і створює тестовий псевдовипадковий сигнал, а аналізатор спектру використовується як приймач. Програмне забезпечення TS-5GCS розроб-

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

лено на основі пакету MatLab. Результат кореляції сигналів відображається дисплеї аналізатора (рис. 1.4).

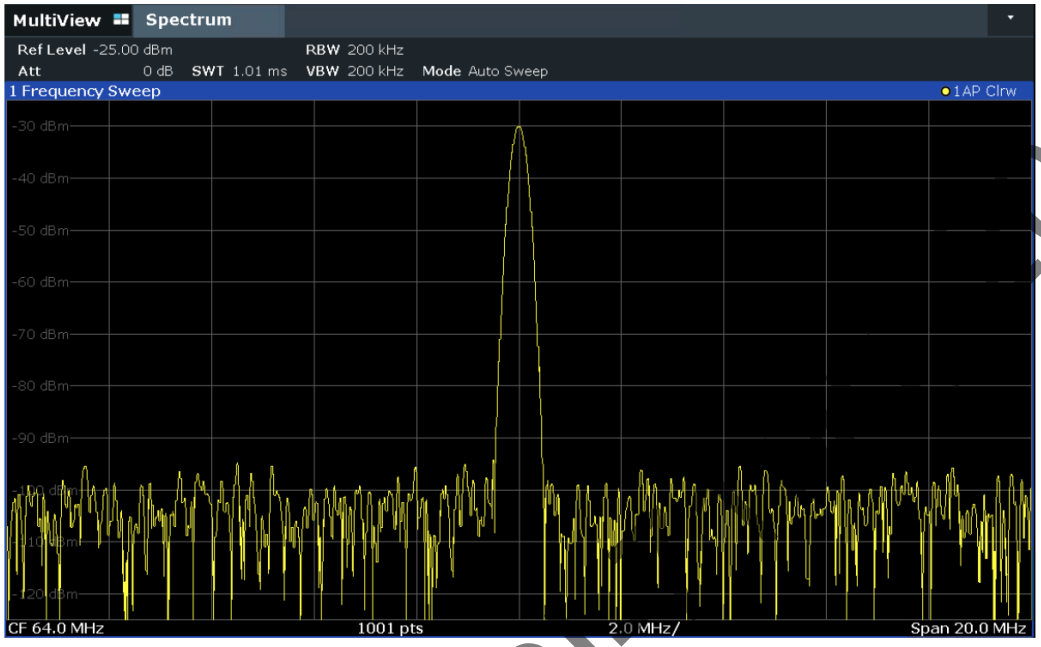


Рисунок 1.4 — Відображення спектрограми сигналу на аналізаторі сигналів і спектра R&S FSW [13]

Аналогічні програмно-апаратні вимірювальні системи на основі персональних комп'ютерів розробляються корпорацією *National Instruments*. Слід відзначити дві особливості продукції цього виробника. По-перше, програмне забезпечення розробляється у середовищі *LabView*, де на графічній мові програмування створюються прикладні програми (віртуальні прилади), які з апаратними інтерфейсами та відповідними давачами (пристроями збору даних) складають вимірювальний комплекс [15]. Зокрема компанією представлено модуль векторного аналізатора PXIe-5668 з робочим діапазоном частот від 20 Гц до 26,5 ГГц, за допомогою якого можна досліджувати сигнали бездротових мереж LTE-Advanced (стандарт IEEE 802.11ac) [16].

Вказаний модуль аналізатора має декілька гірші метрологічні характеристики, ніж подібні пристрої *Rohde & Schwarz* [13] і *Keysight Technologies* [14]: його динамічний діапазон складає 75 дБ, спектральна щільність власних шумів не перевищує мінус 150 дБмВт/Гц (за нормальними умовами), а похибка вимірювання

Зінченко, О. В. Р... 2018

амплітуди — ± 1 дБ. Проте конструктивно він має більшу гнучкість, оскільки на його основі та персонального комп'ютера з встановленим пакетом *LabView* можна розробляти більш складні вимірювальні системи.

Як було сказано вище однією з основних характеристик каналу зв'язку мм-діапазону є притаманний йому рівень завад, що суттєво вливає на якість передачі. На сучасному етапі розвитку систем мобільного зв'язку найбільш перспективними є технології, що використовують ортогональне частотне мультиплексування (OFDM), яке також планується застосовувати й у більшості систем мобільного зв'язку нового покоління. При цьому деякі OFDM-системи, наприклад, WLAN, функціонують в частотних діапазонах, що не ліцензуються, де можливі перешкоди, які можуть істотно погіршити характеристики OFDM систем (см [18]). Завади можуть мати різне походження. Наприклад, їх джерелами можуть бути бездротові мережі, радіотелефони, електронні сигнали іншого походження. Основні методи їх придушення вказані у праці [18].

У випадку застосування метода OFDM дані передаються блоками [6, 8], проте точна функціональна залежність між імовірностями блокової та бітової помилок невідома. Автором [18] у результаті комп'ютерного моделювання така залежність визначена, і за її допомогою розрахована залежність спектральної ефективності γ помилки від співвідношення середніх потужностей сигналу та шуму P_S/P_N. На рис. 1.5 представлені результати моделювання залежності спектральної ефективності від співвідношення потужностей сигналу та шуму для запропонованого автором алгоритму адаптації швидкості передачі даних для різної частини піднесних, що уражені завадами. Як видно з рисунка при $P_S/P_N > 25$ дБ спектральна ефективність залежить лише від зовнішньої завади і може зменшуватись майже удвічі при зростанні її рівня на 20-30%.

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

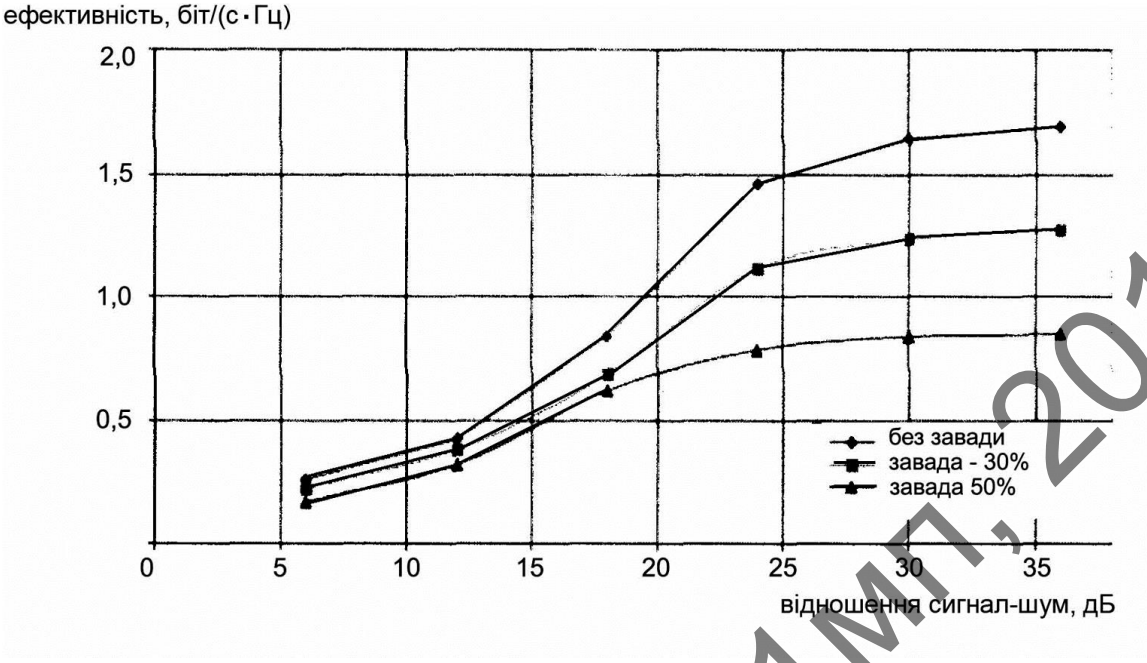


Рисунок 1.5 — Залежність спектральної ефективності від співвідношення сигнал-шум [18]

Вказана завада, у загальному випадку може бути наслідком багатьох факторів, зокрема вона може представляти внутрішньосистемну заваду як наслідок функціонування радіомережі стільникової структури, тобто представляти підсумковий сигнал усіх інших абонентів як даного, так і сусідніх стільників. Отже результати вимірювання параметрів радіоканалу із застосуванням класичних методів і стандартних засобів, що описані вище, можуть надати неточну оцінку його стану. Тому потрібні нові методи, що дозволяють отримати інтегральну оцінку основних параметрів каналу зв’язку.

Авторами патенту [19] запропоновано декілька варіантів способу оцінки шуму в системі множинного доступу з ортогональним частотним розділенням сигналів (OFDM). Один з них складається з таких етапів:

- приймання символів OFDM у системі бездротового стільникового зв’язку, причому символи OFDM відповідають періоду символів;
- визначають невиділену допоміжну несну частоту за період символів;
- визначають, протягом періоду символів, потужність сигналу у смузі частот, що відповідає невиділеній допоміжній несної частоті;

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

– зберігають значення потужності сигналу у пристрої пам’яті; і усереднюють потужність сигналу за допомогою раніше збережених значень, щоб генерувати оцінку шуму.

Визначена величина оцінки може бути використана у пристрої, який має приймач та детектор сигналів OFDM для розпізнавання протягом періоду символів OFDM, причому вихід детектора підключений до процесора, за допомогою якого визначається невиділена допоміжна несна частота, що дозволяє оцінити рівень прийнятої потужності у смузі частот невиділеної допоміжній несної частоти і на основі цього отримати оцінку шуму.

В патенті [20] запропоновано метод оцінки ефективної дисперсії примежевих гармонік, які створюють завади у сусідніх каналах по відношенню до того, у якому передається сигнал OFDM.

Оскільки OFDM-сигнали є сумою декількох гармонічних сигналів, що описуються ортогональними на інтервалі часу визначення функціями, то через нелінійності характеристики передачі вихідного тракту передавального пристрою можуть мати місце амплітудні та фазові спотворення модульованих сигналів і створюватись інтермодуляційні завади, навіть у режимі номінальної потужності. Це спричиняє більші енергетичні втрати у порівнянні з немодульованими сигналами. Авторами [21] досліджено процес створення таких завад і розроблено методику оцінки їх загальної потужності. Методика базується на розрахунку спектральної щільності вказаних завад шляхом перетворення Фур’є кореляційної функції квадратурного каналу. Обґрунтуванням цього підходу є статистична незалежність квадратурних компонент OFDM-сигналів, що розглядаються як випадковий гаусовий процес.

На рис. 1.6 приведена залежність відношення сигнал/завада від частоти як відношення спектральних щільності потужностей OFDM-сигналів та інтермодуляційних завад, що розрахована в [21] з використанням розробленої методики. З рисунка видна нерівномірність спектральної потужності інтермодуляційних завад у смузі сигналів — різніця у центрі та по краях смуги сягає 1,6 дБ.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

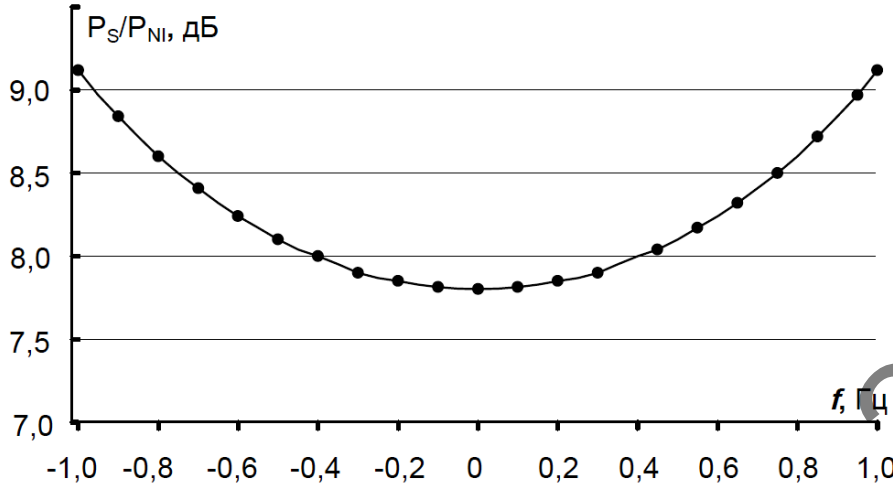


Рисунок 1.6 — Частотна залежність від співвідношення сигнал-шум для інтермодуляційної завади [21]

Метод оцінки каналу передачі даних та просторової обробки сигналів в системах дуплексного зв'язку та часового розділення (TDD) з множиною входів і множиною виходів (MIMO) розглянуто в [22]. Відмічено, що для передачі даних на одній або декількох власних модах каналу MIMO, необхідно виконати просторову обробку в приймачі та звичайно також в передавачі.

Оскільки потоки даних, від передавальних антен схрещуються один з одним в приймальних антенах, необхідно виконати просторову обробку сигналів. Для цього потрібна точна оцінка відповіді каналу між передавачем та приймачем. Таким чином, застосування методу MIMO, який передбачається широко застосовувати в системах мобільного зв'язку п'ятого покоління також потрібує оперативної оцінки стану радіоканалу. Через те, що основні його характеристики залежать від рівню шумоподібних сигналів, доцільно провести аналіз можливості застосування радіометричних методів.

1.4 Радіометричні методи вимірювання широкосмугових сигналів

Відмінною рисою радіометричних методів та засобів є здатність вимірювати параметри сигналів малої потужності які мають шумовий або шумоподібний спектр у певному частотному діапазоні $\Delta f = (f_u - f_d)$, де f_u і f_d — відповідно верхня та нижня частоти зазначеного діапазону. До шумоподібних сигналів від-

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

носять складні сигнали, частотний розподіл енергетичних характеристик яких близький до аналогічних характеристик «квазібілого» шуму. Радіометричні приймачі здатні вимірювати параметри вказаних сигналів і у тому випадку, якщо їх середня потужність менша за середню потужність власних шумів у робочій смузі частот.

Одним з основних параметрів шумових сигналів є спектральна щільність їх потужності шуму (СЩПШ). У випадку шумоподібних сигналів аналогічним параметром буде спектральна щільність потужності вказаних сигналів, яку для зручності будемо позначати також СЩПШ. Визначення даного параметра складається з таких етапів [23]:

1) частотна фільтрація сигналів, умови (параметри) якої залежать від мети вимірювань, що проводяться;
2) нелінійне (гетеродинне) перетворення шумоподібного сигналу на виході фільтру у шумоподібний сигнал проміжної частоти (ПЧ) з подальшим його підсиленням у діапазоні ПЧ та детектуванням;
3) часове накопичення результатів такого перетворення вихідного сигналу, з метою виділення постійної складової напруги, значення якої пропорційне СЩПШ (або середній потужності) вихідного сигналу.

Приймач радіометричного типу або радіометрична система (РС) складається з блоку НВЧ, у якому здійснюється перетворення сигналів надвисокої частоти, блоку ПЧ, де здійснюється підсилення та сигналів проміжної частоти, а також квадратичне детектування, та низькочастотного (НЧ) блоку, призначеного для виділення постійної складової напруги низькочастотного сигналу, величина якої пропорційна потужності вхідного НВЧ сигналу. Існує декілька схем побудови пристроїв такого типу [24-26].

Першу схему мікрохвильового приймача радіометричного типу запропонував Р. Г. Дайк (Robert Henry Dicke), який проводив дослідження шумового електромагнітного випромінювання атмосфери. В основу цього приймача був покладений модуляційний метод, завдяки якому можна було реєструвати шумові електромагнітні сигнали з величиною СЩПШ від 10^{-22} Вт/Гц і більше. Запропонований

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

приймач (яка зараз носить ім'я автора [24]), що був використаний для визначення температури віддалених джерел через виміряне у надвисокочастотному діапазоні значення СЩПШ, відноситься до радіометричних систем модуляційного типу, принцип дії яких детально розглянуто в літературі (див., наприклад, [24-27]). У наступний період РС такого типу знайшли застосування в інших областях науки та техніки [23, 24, 26, 28-30].

Радіометричні методи дозволяють реєструвати низькоінтенсивні шумоподібні сигнали, які, перш за все, створюються у результаті теплового руху заряджених або поляризованих частинок. Джерела таких сигналів представляють фізичні тіла, що містять такі частинки і нагріті до температури, більшої ніж у навколишнього середовища. В результаті тепловий рух зазначених частинок, який відноситься до випадкових процесів, спричиняє виникнення електромагнітного випромінювання, параметри якого також є випадковими величинами, а поле має флуктуаційний характер [31]. Спектр такого випромінювання описується відомим законом Планка

$$p = hf\left[\frac{1}{\exp\left(hf/kT\right)-1} + \frac{1}{2}\right], \qquad (1.5)$$

де p — СЩПШ шумоподібного випромінювання; f — частота, для якої визначається СЩПШ; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — стала Планка; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/Гц·К — стала Больцмана.

Максимальна інтенсивність залежить від температури вказаного джерела. Таке електромагнітне випромінювання має широкий діапазон частот і називається тепловим и описується термодинамічними законами, характерними для рівноважних процесів. Спектр випромінювання у повній термодинамічній рівновазі не залежить від природи речовини, а визначається, у загальному випадку, законом Планка (1.5). РС дозволяє визначити не абсолютне значення за формулою (1.5), різницю між СЩПШ досліджуваного об'єкта (p) та СЩПШ власних шумів (p_{PC}), тобто надлишкове значення (або надлишкову СЩПШ) [32] за формулою

Зінченко, О.В. РІ-71мп. 2018

$$\Delta p = p - p_{PC} = hf\left(\frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{k(T_0+\Delta T)}\right)-1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{kT_{PC}}\right)-1}\right). \quad (1.6)$$

Дана формула значно спрощується для радіодіапазону, оскільки $hf/kT_0 << 1$. Тому $\exp(hf/kT_0) \approx 1+(hf/kT_0)$, або $\exp(hf/kT_0)-1 \approx (hf/kT_0)$. Таким чином формулу Планка (1.6) можна замінити формулою Найквіста

$$\Delta p = p - p_0 = hf\left(\frac{k(T_0+\Delta T)}{hf} + \frac{kT_0}{hf}\right), \text{звідси } \Delta p = k\Delta T, \quad (1.7)$$

де Δp — надлишкова СЩПШ досліджуваного об'єкта.

Через низьку інтенсивність власного теплового випромінювання, що реєструється радіометричним методом потрібне застосування РС з чутливістю 10^{-17} - 10^{-13} Вт у діапазоні робочих частот від 1-100 ГГц [25-30].

Аналіз розвитку радіометричних методів дозволяє зробити висновок, що останніми роками поширюється застосування РС систем мм-діапазону довжин хвиль, вибір якого обумовлено, головним чином, можливістю локалізувати передачу та прийом сигналів у малому тілесному куті за відносно невеликих розмірів антени, а також малим рівнем природніх шумів на вході приймача [26].

Проте слід відзначити, що, перш за все, радіометричні методи використовуються як інструмент спостереження стану фізичних об'єктів, наприклад, у зондуванні земної поверхні під час. Вони дозволяють визначити такі електромагнітні характеристики та показники об'єктів як випромінювальна здатність та коефіцієнт відбиття у заданому частотному діапазоні, а також їх залежність від температури, що необхідно враховувати при проектуванні відповідних радіотехнічних пристроїв та систем.

Розвиток телекомунікаційних бездротових мереж, зростання кількості передавачів та приймачів, що функціонують одночасно, складна форма сигналів, що

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

передаються через канал зв'язку, та їх статистична незалежність, способи кодування та шифрування дозволяють зробити висновок, що радіометричні методи можна застосовувати для вимірювання певних характеристик радіоканалу. Наприклад, можна визначати за їх допомогою рівень шуму у каналі зв'язку та його пропускну здатність. Особливо це стає актуальним для радіомереж та інших телекомунікаційних систем мм-діапазону.

Структура радіометричних систем залежить від методу перетворення вхідних сигналів. Найбільш поширені компенсаційний, кореляційний та модуляційний методи такого перетворення [24, 25].

Компенсаційна радіометрична система має спрощену структурну схему, яка приведену на рис. 1.7 [25]. До її складу входить вхідний підсилювач (*A1*), квадратичний детектор (*U1*), фільтр нижніх частот (*Z1*), джерело опорної напруги (*ДОН*), пристрій порівняння (*A2*) та індикатор (*P1*). До пристрою порівняння реалізується пряме перетворення вхідного сигналу, що приймається антеною *X1*.

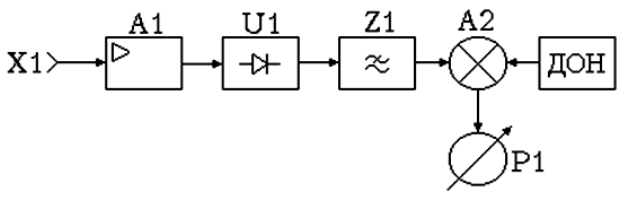
До переваг РС компенсаційного типу можна віднести простоту схеми та високий коефіцієнт передачі радіометричного тракту. Це дозволяє отримати більш високу, ніж у радіометрів інших типів, чутливість, яка визначається за формулою [27]

$$\Delta P_{KM} = 1,41 P_N \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}, \qquad (1.8)$$

де ΔP_{KM} — середня потужність вхідного сигналу у смузі робочих частот Δf підсилювача високої частоти *A1*;

P_N — потужність шуму приймального каналу РС;

ΔF — смуга пропускання фільтра на виході квадратичного детектора



Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

Рисунок 1.7 — Спрощена структурна схема компенсаційної радіометричної системи: *X1* — антена; *A1* — вхідний підсилювач високої частоти; *U1* — квадратичний детектор; *Z1* — фільтр нижніх частот; *A2* — пристрій порівняння; *ДОН* — джерело опорної напруги; *P1* — індикатор [25]

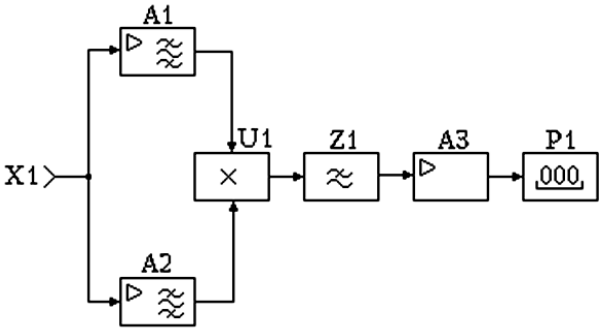
Через необхідність забезпечення великого підсилення вхідного тракту, оскільки вимірюються сигнали з наднизькою СЩПШ, значно зростають флуктуації коефіцієнта передачі РС і, відповідно, флуктуацій постійної складової на виході детектора, які неможливо компенсувати. Тому зростає величина порогу чутливості, тобто збільшується мінімальне значення вхідного шумоподібного сигналу, що вимірюється [23]. На поріг чутливості РС компенсаційного типу суттєво впливає флікер-шум на виході детектора, СЩПШ якого зростає на низьких частотах (до 1 кГц) [25].

Кореляційна радіометрична система є перспективною для вимірювання енергетичних характеристик шумових та шумоподібних сигналів. Спрощені структурні схеми таких радіометрів показані на рис. 1.8 *а*, *б*.

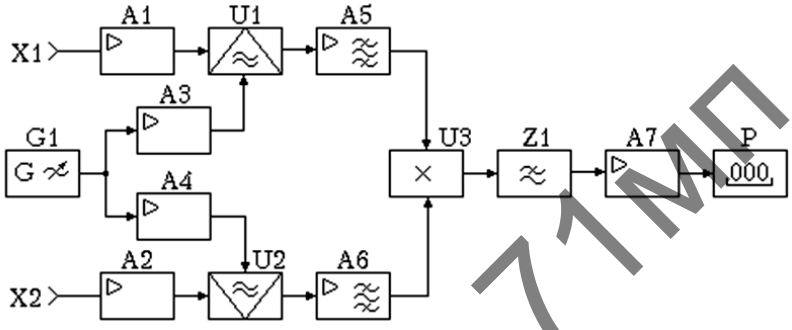
Схема кореляційної РС, що показана на рис. 1.8 *а*, реалізує вимірювання автокореляційної функції виконана за схемою прямого перетворення [25].

РС з перетворенням частоти вхідного сигналу (рис. 1.8 *б*) складається з двох ідентичних за характеристиками каналів, на вході кожному із яких включені приймальні антени (*X1*, *X2*), що з'єднуються з відповідними підсилювачами високої частоти (*A1*, *A2*), перетворювачами частоти (*U1, U2*) та буферними підсилювачами (*A3*, *A4*), через які сигнал гетеродину (*G1*) поступає на перетворювачі. Вихідні сигнали перетворювачів *U1* та *U2* через підсилювачі проміжної частоти *A5* та *A6* поступають до перемножувача *U3* і далі через фільтр нижніх частот *Z1* та інтегратор *A6* — до індикаторного пристрою *P*.

Зінченко О. В. РІ-71Мп, 2018



а



б

Рисунок 1.8 — Спрощені структурні схеми радіометричних систем кореляційного типу [25]

Таким чином на вихідний сигнал кореляційної РС має постійну складову, рівень якої характеризує величину кореляційного зв’язку.

Чутливість кореляційного радіометра визначається виразом [27]

$$\Delta P_{KP} = 2P_N \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}, \qquad (1.9)$$

де ΔP_{KP} — середня потужність вхідного сигналу у смузі робочих частот Δf підсилювача високої частоти кореляційної РС.

Таким чином даний тип РС має чутливість в 1,41 рази меншу ніж компенсаційний. Крім того, недоліками кореляційних РС є підвищення порогу чутливості також внаслідок проникнення власних шумів одного каналу в інший канал, а також створення додаткової постійної складової вихідного сигналу. До того ж, складно реалізувати на практиці ідентичність фазочастотних характеристик каналів [23].

Зінченко, О. В. РІ-71Мп, 2018

Модуляційний радіометрична система використовується для приймання та реєстрації електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот, від мікрохвильового діапазону до оптичного. Суттю модуляційного методу є почергове перетворення у каналі РС сигналу, що вимірюється, та еталонного сигналу (параметри якого не змінні у часі). Таке чергування здійснюється за допомогою комутації відповідних джерел вказаних сигналів. Еталонним сигналом є стабільний шумовий (або шумоподібний) сигнал у всій робочій смузі частот системи. За своїми характеристиками він є ідентичним досліджуваному сигналу.

Найбільш простим і надійним джерелом сигналів такого типу у мікрохвильовому діапазоні є тепловий генератор шуму, який представляє узгоджене навантаження. СЩПШ його випромінювання можна розрахувати за формулою Найквіста (1.7). Якщо подібне джерело не входить до складу РС, то під час вимірювань слід підключати його до входу РС і провести її калібрування.

Один із перспективних варіантів побудови модуляційного радіометра з перетворенням вхідної частоти та використанням пристрою зміщення частоти (ПЗЧ) [25] наведений на рис. 1.9. Сигнал з виходу антени X1 поступає на дільник потужності A_0, а далі — частково через комутатор *U1* та підсилювач надвисокої частоти *A1* на один зі входів змішувача *U2* (сигнал U_C) та частково на вхід ПЗЧ (сигнал U_1). Такий пристрій може бути виконаний, наприклад, на аналогових або дискретних фазообертачах. Він забезпечує зсув частотного спектру вхідного сигналу на значення вибраної проміжної частоти ω_1.

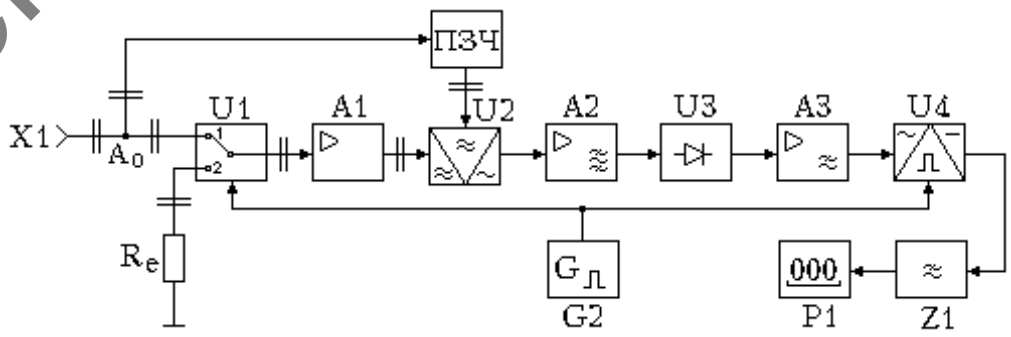


Рисунок 1.9 — Модуляційний радіометр зі зміщенням частоти [25]

Зінченко О. В. РІ-71мп. 2018

Сигнал U_1 має амплітудну модуляцію з частотою імпульсів генератора G, який керує комутацію $U1$. З іншого виходу G аналогічні імпульси подаються на один зі входів синхронного детектора $U4$. Вихідний сигнал ПЗЧ має напругу [25]

$$U_{U1} = \frac{U_C U_1}{2}\cos(\omega + \omega_1 t), \text{ або}$$

$$U'_{U1} = \frac{U_C U_1}{2}\cos(\omega - \omega_1 t),$$

Вихідний сигнал ПЗЧ поступає на інший вхід змішувача частоти$U2$. В результаті перетворення вхідних сигналів на виході змішувача отримуємо сигнал напругою [25]

$$U_{U2} = \frac{U_C^2 U_1}{4}\cos\omega_1 t + \frac{U_C^2 U_1}{4}\cos(2\omega + \omega_1)t.$$

Перша складова даного сигналу підсилюється підсилювачем проміжної частоти $A2$, а друга — подавляється його селективним фільтром.

З виходу напруги квадратичного детектора сигнал обвідної, що має частоту комутації (тобто частоту слідування імпульсів генератора G) поступає на другий вхід синхронного детектора $U4$. У синхронному детекторі відбувається демодуляція способом перемноження вихідних сигналів квадратичного детектора та генератора імпульсів, в результаті чого виділяється низькочастотний сигнал, який після проходження фільтра нижніх частот має постійну складову, що пропорційна потужності вхідного надвисокочастотного сигналу.

Чутливість радіометричної системи модуляційного типу в 2 рази гірша ніж у компенсаційного радіометра і визначається за формулою [27]

$$\Delta P_{KP} = 2\sqrt{2}P_N\sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}. \qquad (1.10)$$

Проте простота реалізації РС за модуляційною схемою, надійність у роботі є причиною їх широкого використання для визначення енергетичних параметрів шумових та шумоподібних НВЧ-сигналів низької потужності. Широке застосу-

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

вання радіометричних методів потрібує подальшого вдосконалення та обґрунтування покладених в їх основу моделей.

Таким чином, аналіз можливостей та схем побудови показав перспективність використання у мм-діапазоні довжин хвиль модуляційних радіометричних систем [24, 25].

Проведений аналітичний огляд літературних джерел підтверджує широке застосування радіометричних методів у багатьох галузях науки та техніки. Вони дозволяють отримати інформацію про різноманітні параметри та характеристики фізичних об’єктів, зокрема рівню шуму та шумоподібних завад у каналах зв’язку.

Проте радіометричні методи, що базуються на контролі енергетичних характеристик електромагнітного випромінювання, на даний момент недостатньо розвинуті щодо їх застосування для вимірювання параметрів шумоподібних сигналів відносно вузького спектру частот, яким характеризуються сигнали сучасних телекомунікаційних мереж. Тому тема магістерської дисертації являється актуальною.

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

2 РОЗРОБКА ТА ОБГРУНТУВАННЯ РАДІОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ЗАВАД В КАНАЛІ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Проведений аналітичний огляд показав, що характеристики радіоканалу залежать від багатьох зовнішніх факторів та параметрів апаратури зв'язку, зокрема, загасання сигналу, відбиття від перешкод, у тому числі багаторазового, зміни спектрального складу сигналів, наявності сторонніх електромагнітних завад тощо.

Усе це спричиняє підвищення потужності шуму P_N в каналі відносно потужності корисного сигналу P_S. У той же час, швидкість передачі даних C (в біт/с) через канал залежить від його частотної смуги Δf та визначається за формулою Шеннона (1.2). Можна добитися зростання C через розширення смуги Δf, що простіше реалізувати у більш високочастотних діапазонах.

Міжнародними організаціями, що займаються розподілом частотного ресурсу, за результатами проведених попередніх досліджень запропоновано розробляти майбутні системи бездротового зв'язку у міліметровому діапазоні довжин хвиль, тому у теперішній час готується низка нормативних документів з вимогами до таких систем. Зокрема вже прийнято стандарт IEEE 802.11ad щодо організації радіомереж у діапазоні 60 ГГц. Відповідно актуальною стає задача вдосконалення методів визначення основних характеристик каналі зв'язку радіомереж, що Відповідно актуальною стає задача вдосконалення методів визначення основних характеристик каналі зв'язку радіомереж, які можуть використовуватись на стадіях їх проектування та експлуатації.

У телекомунікаційних мережах п'ятого покоління планується використовувати ділянки міліметрового діапазону довжин хвиль [33], зокрема, E-діапазон, який містить смуги частот 71-76, 81-86 і 92-95 ГГц. Вказані смуги частот активно освоюються для побудови систем зв'зку з надвеликої пропускною спроможністю (більше 10 Гбіт / с), і даному процесу сприяли такі обставини:

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

– поява електронних компонентів міліметрового діапазону з прийнятними параметрами і вартістю;
– високе завантаження НВЧ-діапазону (2-38 ГГц) і необхідність пошуку альтернативних частотних діапазонів;
– розробка нового покоління широкосмугових систем зв'язку, що призвело до стрімкого зростання трафіку в мережах доступу.

Найбільш активно освоюються перші дві смуги Е-діапазону, а також частина $К_а$-діапазону та область біля 60 ГГц. Такий вибір частотних смуг обумовлений тим, що, по-перше, що їх сумарна ширина в 50 разів перевищує смугу частот всіх видів стільникового зв'язку покоління 3G та 4G.

2.1 Аналіз методів передачі сигналів у радіомережах міліметрового діапазону

Завдяки широкій загальній смузі частот, виділених у міліметровому діапазоні для передачі даних зі швидкістю, більшою за 1 Гбіт / с, можна застосовувати багатоканальний режим передачі сигналів і використовувати схеми фазової модуляції, наприклад, двохпозиційну фазової маніпуляції (BPSK) або більш складні схеми модуляції зі швидкістю передачі в повнодуплексному режимі, більшою 10 Гбіт / с [6, 8]. Так радіосигнал при бінарній фазової маніпуляції BPSK (Binary Phase Shift Keying) можна представити у вигляді [34]

$$S[t; U(t)] = \pm U(t)\cos(\omega_0 t) = U(t)\cos(\omega_0 t \pm \pi)$$

Видно, що модульований сигнал складається з гармонічних коливань, фаза яких в залежності від переданого символу дорівнює +1 або –1, і може змінюватися стрибком на $\pm\pi$. Як правило, в цифрових системах передачі, форма символу є прямокутною

$$v(t)\begin{cases}1 & \text{для } 0 \le t \le T_c \\ 0 & \text{для } 0\end{cases}$$

Зінченко. О. В. РІ-71мп. 2018

Для функції автокореляції можна отримати вираз [34]

$$K(\tau) = b^2 \frac{1}{T_c} \begin{cases} \int_0^{T_c} \upsilon(t+\tau)dt = T_c - \tau & \text{для } 0 \le \tau \le T_c \\ \int_{|t|}^{T_c} \upsilon(t)\upsilon(t+\tau)dt & \text{для } -T_c \le \tau \le 0 \end{cases}$$

А після інтегрування —

$$K(\tau) = \begin{cases} b^2(1 - \frac{|\tau|}{T_c}) & \text{для } |\tau| \le T_c \\ 0 & \text{для } |\tau| > T_c \end{cases}$$

Відомо, що спектральну щільність потужності (СЩП) сигналу при прямокутній формі, що відповідає символу, визначається за допомогою перетворення Фур'є автокореляційної функції

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(\tau)e^{-j\omega t}d\tau = b^2 \int_{-T_c}^{+T_c} \left(1 - \frac{|\tau|}{T_c}\right)e^{-j\omega t}d\tau = b^2 T_c \frac{sin^2(\omega T_c/2)}{(\omega T_c/2)^2}$$

Таким чином, спектральний розподіл енергії модулюючого сигналу описується СЩП, яка має вигляд

$$S_\delta(\omega) = \frac{1}{2}\{S(\omega - \omega_0) + S[-(\omega - \omega_0)]\} =$$

$$= \frac{b^2 T_c}{2}\left\{\frac{sin^2\left[(\omega - \omega_0)\frac{T_c}{2}\right]}{\left[(\omega - \omega_0)\frac{T_c}{2}\right]^2} + \frac{sin^2\left[-(\omega - \omega_0)\frac{T_c}{2}\right]}{\left[-(\omega - \omega_0)\frac{T_c}{2}\right]^2}\right\}$$

Фізичний спектр, що можна визначити експериментальними методами, враховує тільки для позитивні частоти може бути розрахований з використанням формули

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

$$G_\delta = b^2 T_c \left\{ \frac{sin^2\left[(\omega-\omega_0)\frac{T_c}{2}\right]}{\left[(\omega-\omega_0)\frac{T_c}{2}\right]^2} \right\} \text{ де } 0 \le \omega \le +\infty$$

Використовуючи логарифмічну шкалу можна записати СЩП у децибелах (дБ)

$$G_\delta(f) = 10lg\left\{ \frac{sin^2\left[2\pi(f-f_0)\frac{T_c}{2}\right]}{\left[2\pi(f-f_0)\frac{T_c}{2}\right]} \right\} = 10lg\left\{ \frac{sin^2[\pi(f-f_0)T_c]}{[\pi(f-f_0)T_c]^2} \right\}$$

$$= 10lg\left\{ \frac{sin^2[\pi(f-f_0)/R_b]}{[\pi(f-f_0)/R_b]^2} \right\}$$

де $R_B = 1/T_C$ — швидкість передачі інформації у символ/с, тобто для модуляції BPSK (ФМ-2) за час тривалості символу (в секундах) за час T_C передається 1 біт [34]. Добуток $(f-f_0)T_C = (f-f_0)/R_B$ є безрозмірним і часто використовується при побудові графіків спектрів для різних способів модуляції [34].

Оскільки на відміну від вузькогосмугового каналу необхідність стиснення даних при такій передачі відсутня, апаратна реалізація системи зв'язку в міліметровому діапазоні, зокрема в Е-діапазоні, може бути відносно простою. В ряді випадків можна використовувати модеми з модуляцією низького порядку, нелінійні підсилювачі потужності, приймачі з прямим перетворенням та інших нескладні пристрої. Це дозволяє знизити вартість системи, не погіршуючи її функціональні параметри і надійність. Так, виробники радіорелейних ліній в Е-діапазоні у складі свого обладнання використовують модеми зі схемами модуляції від BPSK до 16-QAM.

Так, схеми з частотною маніпуляцією (FSK) або двопозиційною фазовою маніпуляцією в смузі 5 ГГц легко забезпечують передачу даних зі швидкістю до 2 Гбіт / с. Оскільки прості схеми модуляції не вимагають високої лінійності трактів передачі та приймання сигналів в трансиверах, то підсилювачі потужності передавача можуть працювати в режимі максимальної вихідної потужності. А велика вихідна потужність поряд з високим коефіцієнтом посилення антени забезпечує високу випромінюючу потужність, що дозволяє компенсувати можливі втрати

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

передачі. Таким чином системи мм-діапазону можна порівнювати з характеристиками з НВЧ-системам зв'язку "точка-точка". Проте спрощення схемної структури апаратних засобів та методів передачі сигналів через канал зв’язку, може привести до додаткових джерел завад та шуму у таких мережах, розрахунок рівню яких є можливим за відомими для мобільних мереж методиками.

При невисокій швидкості модуляційних символів цього цілком достатньо для отримання швидкості передачі даних 1 Гбіт/с. Крім здешевлення конструкції модему, застосування простих типів модуляції підвищує достовірність прийому інформації, оскільки зростає відстань між можливими положеннями модуляційних символів. Це означає збільшення системного підсилення. Наприклад, застосування метода модуляції QPSK в порівнянні з 256 QAM еквівалентно збільшенню потужності на 20 дБ (рис. 2.1) [35]. Наприклад, для роботи однієї лінії зв'язку Е-діапазону потрібна одна пара частот, причому одна несуча вибирається в смузі 71-76 ГГц, інша — в смузі 81-86 ГГц. Відстань між несучими в 10 ГГц цілком достатньо для роботи дуплексного фільтра приймача. Робота на таких високих частотах дозволяє практично не враховувати інтерференцію електромагнітних хвиль, відбитих від перешкод в зоні поширення сигналу, що виникає в умовах щільної міської забудови.

Крім того, антени для апаратури "точка-точка" Е-діапазону формують дуже вузьку діаграму спрямованості — близько 0,5°. Ці особливості істотно полегшують планування мережі мікрохвильового зв'язку, перш за все у великих містах і промислових центрах.

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

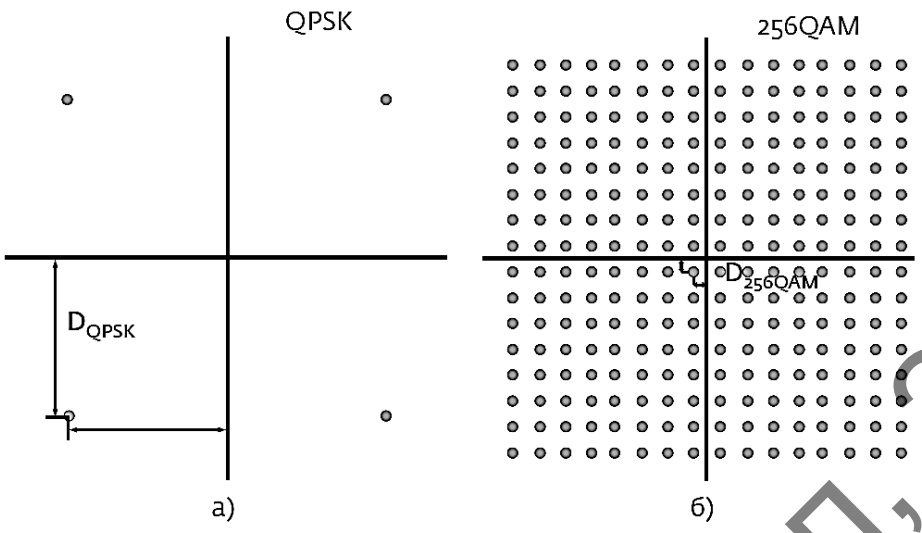


Рисунок 2.1 — Збільшення міжсимвольної відстані на діаграмі Грея при використанні модуляції QPSK (а) в порівнянні з модуляцією QAM-256 (б)

Крім використання широких смуг частот, одночасного застосування рознесених смуг (в E-діапазоні) нормативними документами задаються різних спектральні профілі (частотні маски) для сигналів радіомереж різних просторових розмірів. Наприклад, стандарт 802.15.3c пропонує три режима фізичного рівня, які призначені для різних режимів роботи пікомережі. Усі вони передбачають використання діапазону 57-66 ГГц, який розбивається на чотири канали з рекомендованою шириною 2,160 ГГц кожен. Центральні несні частоти каналів дорівнюють: 58,32; 60,48; 62,64 і 64,80 ГГц [36]. Причому профіль спектру сигналу обмежується маскою, яка приведена на рис. 2.2.

Режим з однією несною (SC) відповідає модуляції однієї несної на канал. При цьому можливо три класи сигнально-кодових комбінацій. Клас 1 призначений для малопотужних дешевих мобільних пристроїв зі швидкістю передачі даних до 1,5 Гбіт/с. Клас 2 передбачає швидкості до 3 Гбіт/с, клас 3 — більш ніж 5 Гбіт/с. У режимі SC підтримуються різні схеми квадратурної модуляції: BPSK, QPSK, 8-PSK і 16-QAM (приведеними у [34], табл. 4), причому сигнальні сузір'я в них повернені проти годинникової стрілки на $\pi/2$. Використовуються два алгоритми захисного кодування (FEC) — блокові коди Роду Соломона (RS) і блокові коди з перевіркою на парність (LDPC). Застосування такого кодування підвищує

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

енергетичну та спектральну ефективність каналу [7], проте одночасно розширюється спектр СЩП сигналів [8, 34].

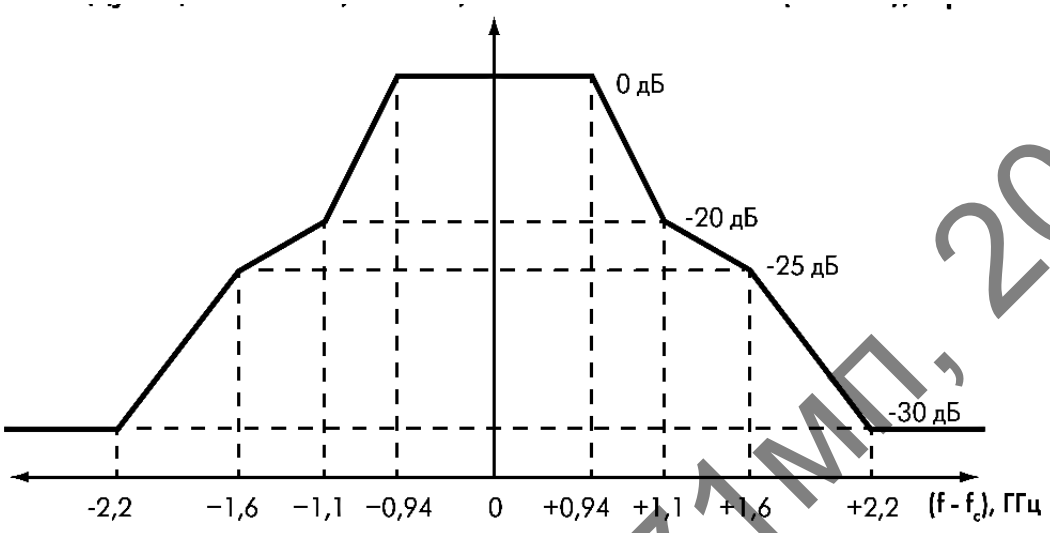


Рисунок 2.2 — Спектральна маска сигналу, що передається через радіоканал мм-діапазону (за вимогами стандарту IEEE 802.15.3c) [36]

Крім того, стандарт передбачає дві додаткові схеми модуляції — ООК (включення - виключення) і DAMI (dual alternate mark inversion). Схема ООК є найпростішою схемою модуляції. Наявність сигналу несучої відповідає логічній одиниці, її відсутність — логічному нулю. Проте, вона дозволяє реалізовувати пристрої з малою ціною та невеликим споживанням енергії, що є актуальним для деяких застовувань.

Модуляція DAMI по відношенню до радіосигналу означає модуляцію однієї бокової смуги. Один символ такої модуляції, як і в випадку з ООК, несе один біт інформації. Проте, швидкості передачі при цьому можуть перевищувати 1,5 та3 Гбіт/с відповідно для ООК і DAMI.

У системах множинного доступу до каналу використовуються методи кодування та модуляції, а також методи захисту інформації, що спричиняють псевдовипадковість параметрів сигналів, а їх спектр стає схожим на спектр електромагнітного шуму у обмеженій смузі частот [37].

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

У бездротових мережах одним з таких методів є мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM – orthogonal frequency division multiplexing). Суть його та технічна реалізація детально висвітлена, наприклад, в [38].

Метод використовує схему модуляції з великою кількістю піднесних, кожна з яких модулюється за звичайною схемою (наприклад, квадратурна фазова модуляція) на низькій символьній швидкості, зберегаючи загальну швидкість передачі даних, як для звичайних схем з однією несною частотою у тій же смузі пропускання каналу. На практиці такі сигнали OFDM отримаються швидким перетворенням Фур'є.

Загальна кількість піднесних в OFDM сигналі вибирається $k = 2^p$ (де p — ціле число) і перевищує 48. Якщо позначити ширину виділеного каналу $f_k = k\delta f$, і припустити, що $\delta f = 1/T_C$ — мінімальна різниця між суміжними частотами, а $n_F = T_C/\Delta t$ — кількість точок швидкого перетворення Фур'є, то спектральну щільність потужності OFDM сигналу можна записати як [38]

$$S(n) = \frac{1}{\sqrt{n_F}} \sum_{k=1}^{n_F} d_k \exp\left(-\frac{j2\pi n}{n_F}\right).$$

Потім сигнал з таким спектром модулює радіосигнал, що випромінюється з антени в радіоканал. Таким чином передається суміш інформаційних символів d_k, число яких дорівнює розмірності n_F. Такий сигнал має шумоподібний спектр, оскільки є сумою досить великой кількості синусоїд з випадковими амплітудами та фазами.

На рис. 2.3 приведено зображено спектр такого сигналу, отриманого у результаті моделювання у середовищі MatLab [39].

Як видно спектр має невеликі флуктуації в основній смузі частот (не більше 5 дБ) та достатньо велике зменшення потужності за межами цієї смуги. Проте швидкість спадання спектру слабка, що є наслідком прямокутної форми обвідної, яка найгірша з точки зору спаду позасмугового випромінювання [39].

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

Рівень позасмугового випромінювання (завад) складає біля мінус 50 дБ для зміни частоти на величину, рівну ширині основної смуги частот. Проте для великої кількості піднесних сумарний рівень може мати достатньо велику величину, яку треба враховувати під час визначення характеристик радіоканалу.

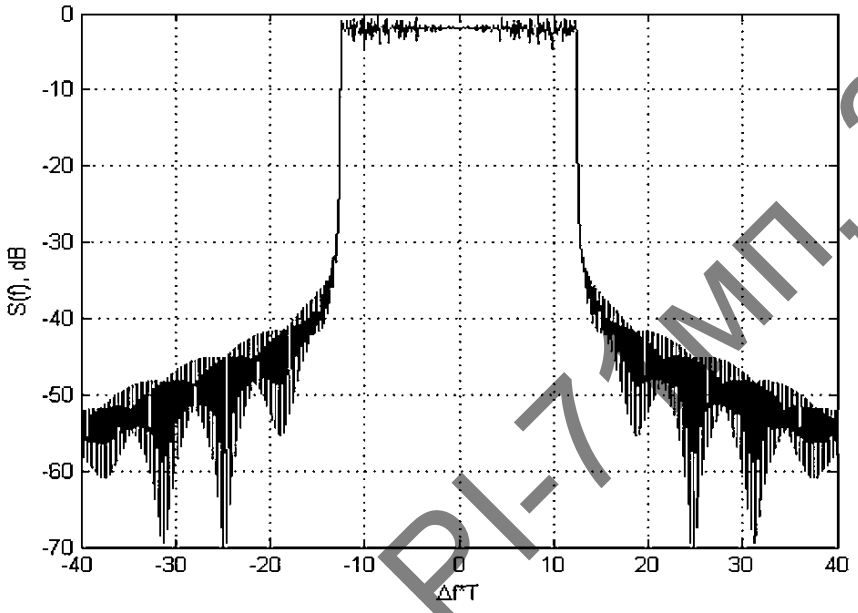


Рисунок 2.3 — Спектр OFDM сигналу (QPSK и N = 128), отриманий у результаті моделювання у пакеті MatLab

Оскільки радіоканал представляє відкрите середовище передачі даних на фізичному рівні моделі OSI, то на його характеристики можуть впливати зовнішні фактори. У першу чергу співвідношення сигнал/шум (завада) визначається умовами поширення електромагнітних коливань через атмосферу.

Відомо, що загасання електромагнітних хвиль у повітрі залежить від частоти (див., наприклад, [33]). На рис. 2.4 показана частотна залежність погонних втрат для повітря. І якщо для електромагнітних хвиль надвисокої та менших частот атмосфера майже прозора. То саме з міліметрового діапазону починається стрімке зростання втрат.

Причому крім загального монотонного зростання спостерігаються піки поглинання, які обумовлені хімічним складом атмосфери та різноманітними украпленнями, зокрема причиною такого поглинання на частотах 22 та 183 ГГц є водя-

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

на пара, а на частотах 60 та 120 ГГц — кисень. Саме ці частоти відповідають хвилям міліметрового діапазону.

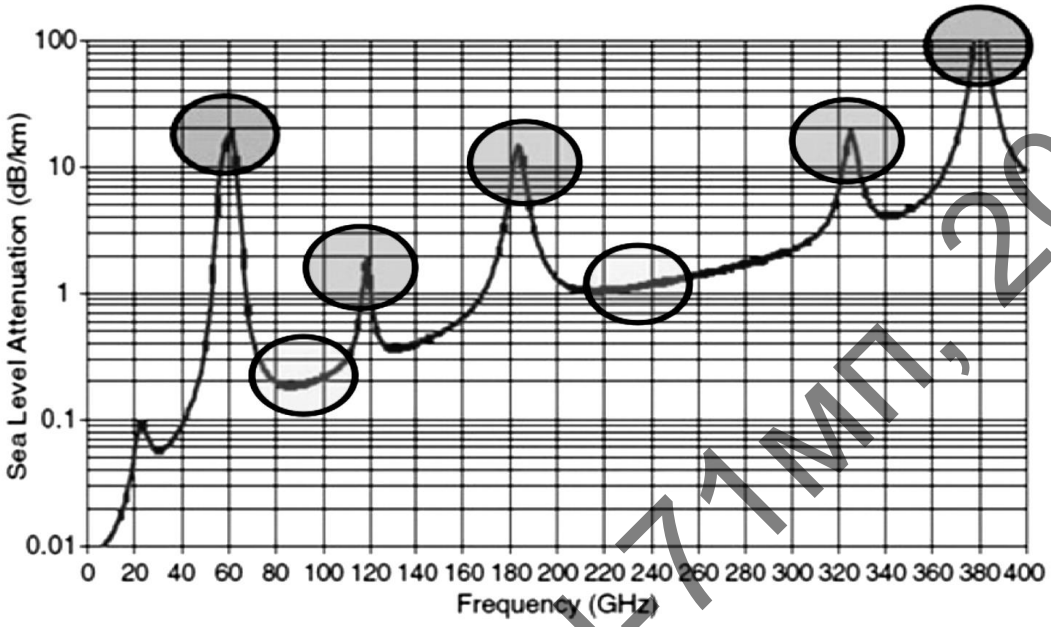


Рисунок 2.4 — Поглинання атмосферою енергії електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону на рівні моря [33]

Крім атмосферного поглинання на пропускну здатність радіоканалу впливають зовнішні перешкоди у вигляді, наприклад, будівель, або їх конструктивних частин. Звертаючи увагу на те, що переважна кількість радіомереж зосереджена у містах або усередині будівель, необхідно враховувати крім поглинання хвиль їх речовиною ще також ефект багатократного відбиття. І якщо на відносно низьких частотах таке відбиття спричиняє явище інтерференції, і як наслідок замирання хвиль, вплив якого усувається технічними методами [6, 38], то у міліметровому діапазоні це може збільшувати загальний рівень завад. Це пояснюється тим, що через багатократне відбиття втрачається кореляційний зв’язок між відбитою первинною та відбитими хвилею.

На рис. 2.5 приведена залежність від відстані, на якої приймався сигнал, відбитий конструкціями будівлі з різною поверхнею [33]. Як видно найбільшу потужність мали сигнал, відбиті гладкою поверхнею скла вікон. Проте сигналі, від-

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

биті стіною мали дуже низькій рівень потужності вже на невеликих відстанях (менших за 1 м) і становились фактично шумоподібними, збільшуючими загальний рівень завад.

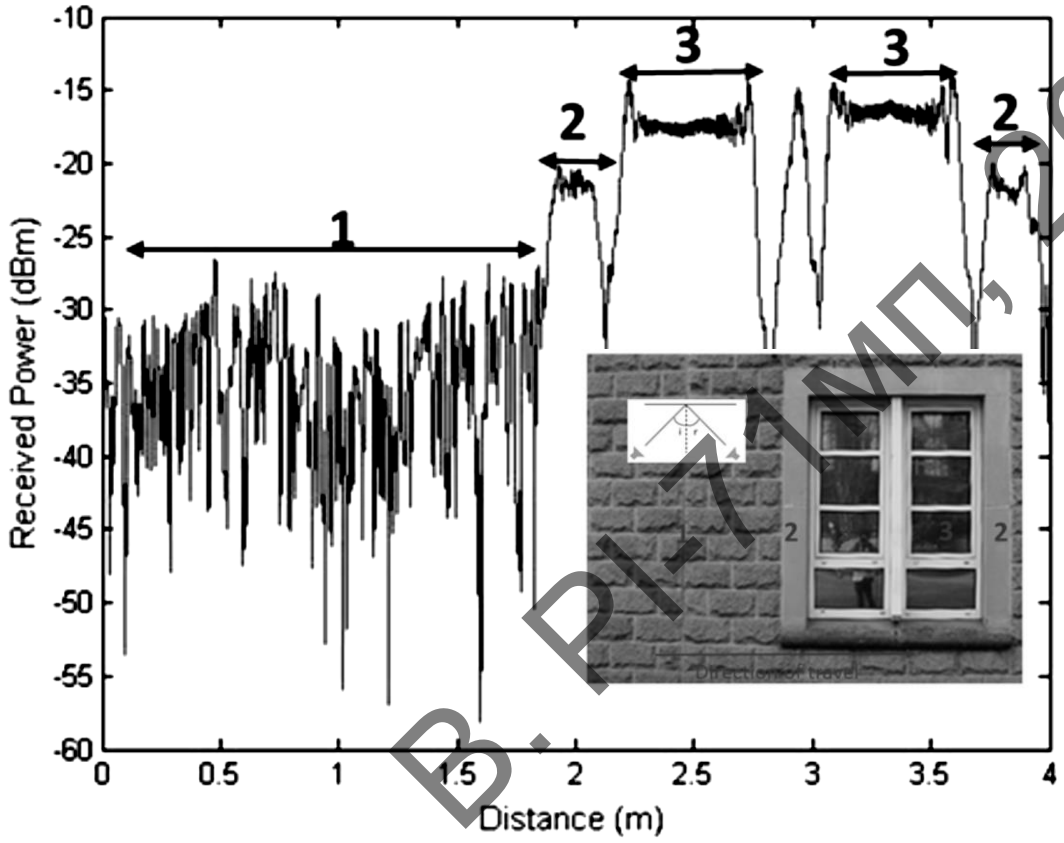


Рисунок 2.5 — Результати дифузійного розсіяння електромагнітного випромінювання частоти 60 ГГц, відбитих 1) стіною будівлі, 2) гладкою поверхнею, 3) склом вікна [33]

Таким чином можна зробити висновок, що поширення інформаційних сигналів у радіомережах, що розташовані у місце може привести до збільшення водночас загального рівню завад. Причому, зрозуміло, що обчислити цей ефект дуже складно, навіть використовуючи відомі моделі, наприклад, модель Окамури-Хати [6], оскільки емпіричні коефіцієнти, що входять до математичного рівняння, можуть випадкового змінюватись через атмосферні умови. У такому випадку більш доцільними будуть експериментальні методи визначення рівню завад.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

2.2 Дослідження енергетичного спектру основних типів завад у радіоканалі

Основні типи завад у мережах стільникового зв'язку можна поділити на внутрішньосистемні та зовнішні групові завади. Внутрішньосистемна завада по відношенню до сигналів певного мобільного терміналу (МТ) або базової станції (БС) створюється сигналами інших МТ або БС, які є сторонніми для даного сеансу зв'язку [6, 40, 41]. Під зовнішньою груповою завадою розуміють заваду аналогічного походження, проте створеною іншими системами радіозв'язку, що працюють в тому ж частотному діапазоні [42]. Наприклад, для мережі стільникового зв'язку у мм-діапазоні таку заваду можуть створювати системи супутникового зв'язку, яким відповідно до Регламенту радіозв'язку [43] виділено певні смуги даного діапазону.

Дослідження характеристик внутрішньосистеминих завад

Розглянемо детальніше внутрішньосистемні завади в стільникових системах мобільного зв'язку. Внаслідок того, що топологія мережі стільникового звязку передбачає багаторазове використання одних і тих же частот, у ній виникають специфічні взаємні завади. Їх умовно можна поділити на два види.

До першого виду належать випромінювання передавачів мобільних станцій у стільниках із однаковими значеннями частот, що погіршують умови функціонування БС виділеного стільнику (рис. 2.6), і для відношення сигнал/шум на вході приймача БС визначається виразом [6]

$$\rho_C^2 = \frac{P_{RC}}{P_{NC} + \sum_{j=1}^{k_1} P_{TM_j}},$$

де P_{RC} — потужність сигналу на вході приймача БС центрального стільнику, що надходить під час сеансу зв'язку від МТ цієї ж стільники; P_{NC} — потужність теплового шуму приймача БС; P_{TM_j} — потужність завади від передавача МТ в стіль-

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

нику *j*-го кластера, що надходить до входу приймача базової станції $БС_0$ центрального стільнику; k_1 — число МТ, що створюють завади під час даного сеансу зв'язку.

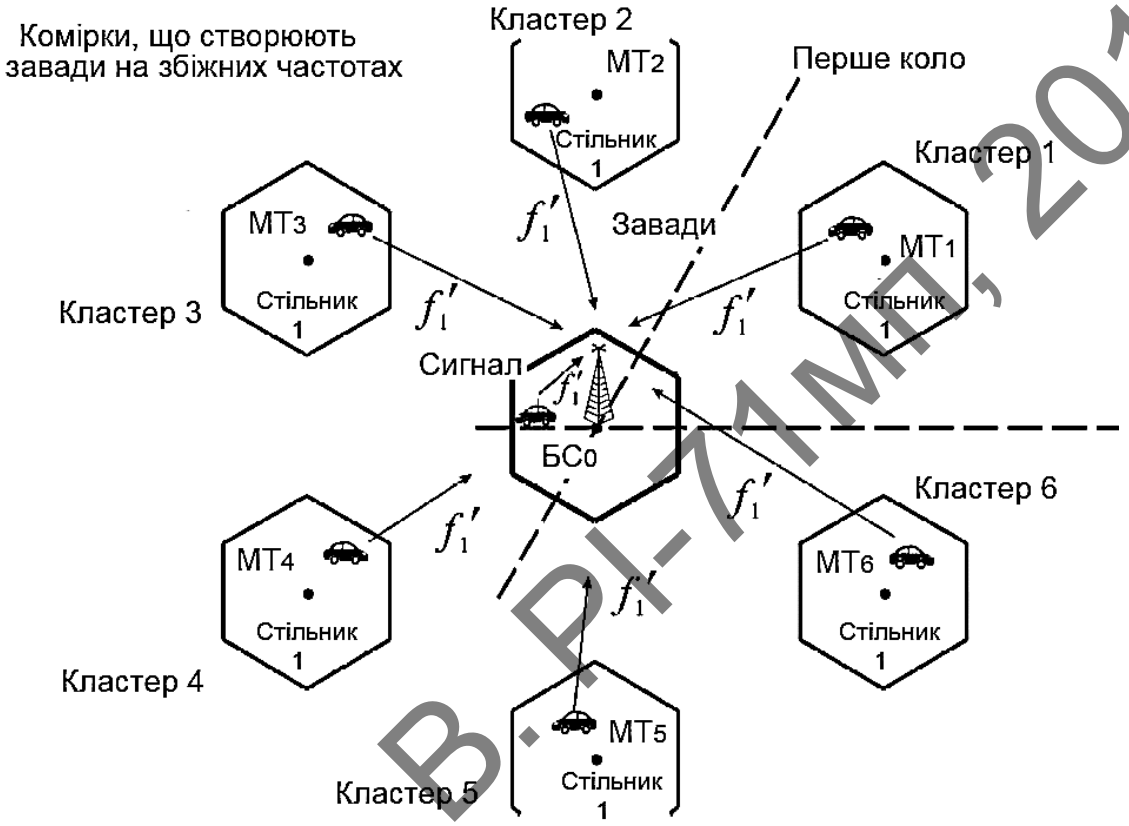


Рисунок 2.6 — Створення внутрішньосистемної завади на вході приймача базової станції [6]

Потужність теплового шуму приймача БС може бути розрахована за формулою

$$P_{NC} = kT_0\Delta f\ ,$$

де T_0 — температура вхідного тракту приймача БС; k — стала Больцмана; Δf — смуга робочих частот приймача.

Передавачі базових станцій $БС_i$ всіх стільників, що мають збіжні частоти у першому колі створюють завади для приймача МТ, що знаходиться в центральній соті. Відношення сигнал/завада на вході приймача МС в цьому випадку

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

$$\rho_M^2 = \frac{P_{RM}}{P_{NM} + \sum_{i=1}^{k_2} P_{TC_i}},$$

де P_{RM} — потужність сигналу на вході приймача МТ центрального стільнику, створювана передавачем БС; P_{NM} — потужність власних шумів приймача МТ; P_{TC_i} — потужність завади від передавача БС в i-му стільнику; k_2 — кількість базових станцій, які створюють під час сеансу зв'язку завади в каналі прийому мобільної станції центрального стільнику.

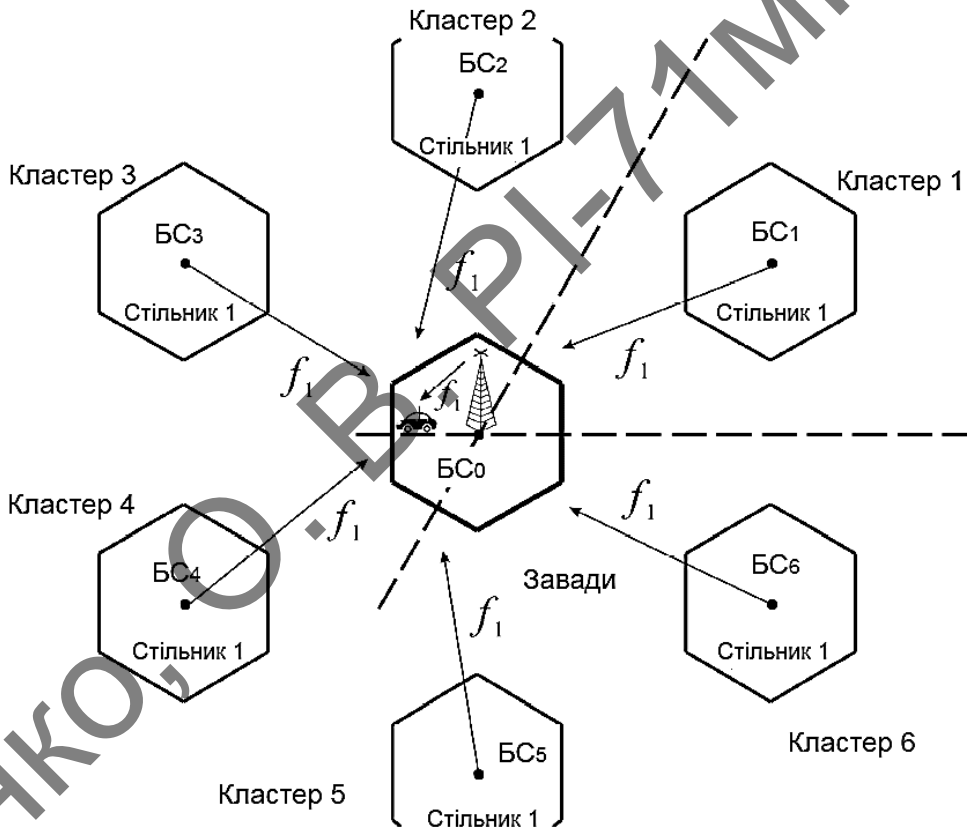


Рисунок 2.7 — Створення внутрішньосистемної завади на вході приймача мобільного терміналу [6]

При малому радіусі стільнику і невеликій розмірності кластера для розрахунку потужності корисного сигналу та завад можна використовувати один і ту ж формулу, у деяких випадках — з різними параметрами.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

Оцінка рівню внутрішньосистемної завади у каналі зв'язку мобільного терміналу

Одним з методів визначення відношення сигнал/завада на вході приймача мобільного терміналу є застосування двопроменевої моделі поширення радіосигналів [6]. Така модель відповідає структурі мережі, коли кожний кластер складається з одного стільника ($K=1$). Розглянемо фрагмент такої мережі складається з трьох стільників, у яких використовуються однакові частоти (рис. 2.8).

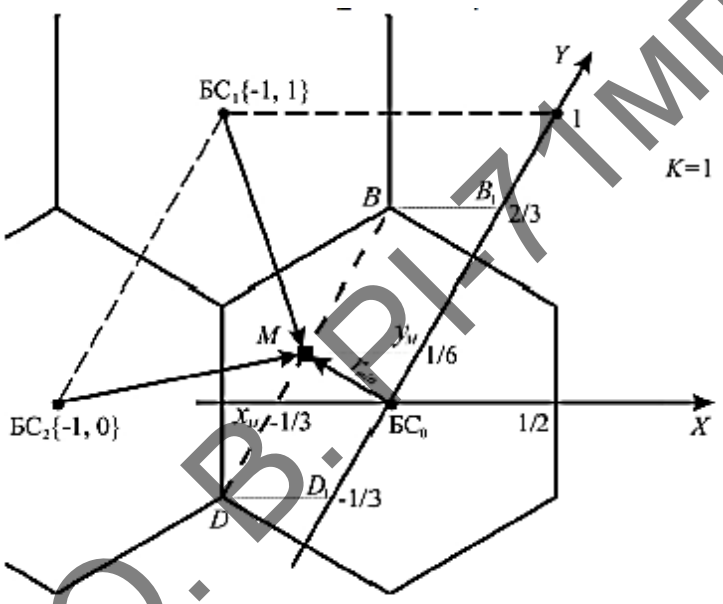


Рисунок 2.8 — Фрагмент стільникової мережі ($K=1$) [6]

Нехай МТ (точка M) рухається вздовж траєкторії DB. Його координати $M(x_M, y_M)$, змінюються, відповідно змінюється також відстань r між МТ та базовою станцією $БС_0$, з якої надходить інформаційний сигнал. Завади на збіжних частотах стоворюються передавачами базових станцій $БС_1$ і $БС_2$, тобто в нашому випадку $k_2 = 2$.

У випадку коли поширення радіохвиль відповідає двопроменевий моделі, потужність сигналу, що надходить до приймача МТ визначається як

$$P_{RM} = \alpha_0 r^{-4},$$

Зінченко, О. В. РІ-171мп, 2018

де $\alpha_0 = P_{TC0} G_{10} G_2 (h_1 h_2)^2$, тут G_{10} —… , G_2 — …, а h_1 і h_2 — відповідно…;

P_{TC0} — потужність передавача базової станції *БС*$_0$.

Для потужності завади для зазначеного МТ маємо

$$P_{TCi} = \alpha_i d^{-4}(x_M, y_M, x_{Ci}, y_{Ci}),$$

де $\alpha_i = P_{TCi} G_{1i} G_2 (h_1 h_2)^2$, тут G_{1i} —…;

P_{TCi} — потужність передавача базової станції *БС*$_i$;

$d(x_M, y_M, x_{Ci}, y_{Ci})$ — відстань від антени *БС*$_i$ до приймача мобільної станції.

Якщо знехтувати власними шумами приймача P_{NM}, то відношення сигнал/шум для зазначеного мобільного терміналу можна переписати як

$$\rho_M^2 = \sum_{i=1}^{2} \frac{\alpha_0 r^{-4}}{\alpha_i d^{-4}(x_M, y_M, x_{Ci}, y_{Ci})}.$$

Якщо припустити, що технічні характеристики приймально-передавальної апаратури та антенно-фідерних систем всіх базових станцій однакові, тобто $\alpha_0 = \alpha_i$ $(i = 1,2)$ тоді формула маємо

$$\rho_M^2 = \frac{r^{-4}}{d_1^{-4}(x_M, y_M, x_{C1}, y_{C1}) + d_2^{-4}(x_M, y_M, x_{C2}, y_{C2})}.$$

Таким чином, розрахунок відношення сигнал/завада зводиться до обчислення трьох відстаней.

Відстань r між МТ і БС$_0$ в загальному випадку визначається як

$$r = \sqrt{x_M^2 + x_M y_M + y_M^2}\ .$$

Знайдемо рівняння лінії *DB*, по якій рухається МТ. Координати точок *D* і *B* у відносній косокутній системі дорівнюють *D*{-1/3; -1/3} і *B*{-1/3, 2/3}, а коефіцієнт k визначається як

$$k = \frac{y_B - y_D}{x_B - x_D} = \frac{(2/3) - (-1/3)}{(-1/3) - (-1/3)} \to \infty.$$

Отже

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

$$y = k(x - x_B) + y_B.$$

Розділивши обидві частини на k, отримаємо

$$x = x_B \text{ або } x_M = -1/3, \quad 1/3 \le y_M \le 2/3.$$

Це є вираз для руху МТ в центральній соті. Слід зауважити, що лінія *DB* паралельна осі *OY*.

$$r(y_M) = \sqrt{y_M^2 - (y_M/3) + (1/9)}, \ -1/3 \le y_M \le 2/3.$$

При деякому положенні точки *M* відстань між МТ і $БС_0$ стає мінімальною $r_{\min} = r$. Визначити це значення можна з рівняння

$$\frac{dr(y_M)}{dy_M} = 0.$$

Після диференціювання отримуємо $y_M = 1/6$, і $r_{\min} = 1/\left(2\sqrt{3}\right) \approx 0{,}3$.

Остаточно розрахункова формула для визначення відношення сигнал / шум на вході приймача МТ має вигляд

$$\rho_M^2 = \frac{\left[y_M^2 - (y_M/3) + (1/9)\right]^{-2}}{\sum_{i=1}^{2}\left[K + r^2 - x_M(2x_{Ci} + y_{Ci}) - y_M(2x_{Ci} + y_{Ci})\right]^{-2}},$$

$$-1/3 \le y_M \le 2/3$$

Слід зазначити, що вираз справедливий тільки для конкретної конфігурації мережі, яка зображена на рис. 2.8.

Уточнення величини рівня внутрішньосистемних завад за моделлю Окамури-Хати

При аналізі поширення радіохвиль в умовах міста або передмістя часто використовують модель Окамури-Хати. Відомо [6, 33], яка дозволяє оцінити середній (медіанний рівень) прийнятого приймачем радіосигналу в умовах статистично однорідного міста.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

Якщо припустити, що заваду створює передавач однієї базової станції, а умови поширення сигналу та завади однакові, то розрахувати відношення сигнал/завада можна за формулою [6]

$$P_{RM} = P_{TC} + G_C - 69{,}55 - 26{,}16\lg f + 13{,}82\lg h_C - \left[45 - 6{,}55\lg h_C\right]\lg r,$$

де P_{TC}, P_{RM} — потужність, відповідно, на виході передавача БС та на вході приймача МТ в дБВт; G_C — коефіцієнт підсилення антени БС; f — частота в МГц; h_C — висота антени БС над рівнем землі; r — відстань між антеною БС та МТ в км.

Для визначеності можна розглядати стільниковою структурою, що показана на рис. 2.8. Використовуючии наведену вище формулу можна представити потужність корисного сигналу, що передає базова станція $БС_0$ на вході приймача МТ, у вигляді

$$P_{RM} = P_{TC0} + G_{C0} - 69{,}55 - 26{,}16\lg f + 13{,}82\lg h_{C0} - \left[45 - 6{,}55\lg h_{C0}\right]\lg r,$$

Аналогічно можна представити потужність внутрішньсистемної завади, що створює базова станція $БС_i$ на вході приймача МТ, як

$$P_{RCi} = P_{TCi} + G_{Ci} - 69{,}55 - 26{,}16\lg f + 13{,}82\lg h_{Ci} - \left[45 - 6{,}55\lg h_{Ci}\right]\lg\left[d_i\left(x_M, y_M; x_{Ci}, y_{Ci}\right)\right].$$

Звідси співвідношення сигнал/завада у дБ складає величину

$$\rho^2_{Mi} = P_{RM} - P_{TCi}.$$

У припущенні, що за технічними характеристиками усі базові станції однакові, тобто $P_{TC0} = P_{TCi} = P_{TC}$, $G_{C0} = G_{Ci} = G_C$, $h_{C0} = h_{Ci} = h_C$, можна отримати

$$\rho^2_{Mi} = \left[45 - 6{,}55\lg h_{Ci}\right]\lg\frac{\left[d_i\left(x_M, y_M; x_{Ci}, y_{Ci}\right)\right]}{r}.$$

де ρ^2_{Mi} —відношення сигнал / завада для базової станції $БС_i$, що створює заваду, у дБ; h_C — висота установки антен базових станцій в метрах.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

Якщо відстань МТ до джерела завад вдвічі більше, ніж до джерела сигналу, то для типових розташувань базових станцій та їх характеристик для см-діапазону можна отримати [6]

$$\rho_M^2 \approx 11 \text{ дБ}.$$

У тому випадку, коли завади створюють декілька передавачів БС із сусідніх кластерів, відношення сигнал/завада на вході приймача МТ розраховується за формулою [6]

$$\rho_M^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} 10^{-0,1\rho_{Mi}^2}} \text{ дБ},$$

де ρ_{Mi}^2 — величина сигнал/завада при дії завади від i-ої БС, що розраховується за попередньою формулою.

Таким чином, застосовуючи дану методику можна оцінити рівень внутрішньосистемних завад у радіомережах стільникового зв'язку в умовах передміської та міської забудови.

Оцінка рівня зовнішньої групової завади у радіоканалі зв'язку

Для визначення рівню групової завади аналітичних виразів у загальному випадку не існує через різноманіття систем радіозв'язку. Проте відомі дані щодо групової завади яку створює мережа стільникового зв'язку 3G [42]. Авторами на основі статистичної обробки даних визначено рівень такого типу завад. Запропонований метод має точність 5-10 дБ. Визначено, що рівень групової завади у см-діапазоні у точці, що приблизно однаково віддалена від БС може змінюватись у межах мінус (63,5–45) дБмВт. Причому монотонно зростає від мінус 63,5 дБмВт, якщо діє одна БС, до мінус 45 дБмВт, якщо функціонують чотирнадцять БС.

Оскільки всі вони, використовують метод кодування OFDM, а також шифрування інформації то такі завади можна вважати адитивними, що і підтверджує відмічене зростання потужності групової завади майже пропорційно числу БС, що працюють.

Зінченко, О. В. РІ-71МП, 2018

Проведений аналіз даних, хоча й виконаний за даними досліджень, зробленими у сантиметровому діапазоні, дозволяє стверджувати, що

- по-перше, розроблення аналогічних моделей для мм-діапазону, представляє дуже складну задачу через додаткові особливості поширення хвиль у такому діапазоні;
- проведені отримані значення середньої потужності завад для см-діапазону набагато перевищують поріг чутливості радіометричних систем; наприклад, середня потужність зовнішньої групової завади за даними [42] складає не менше, ніж $10^{-9,5}$ Вт, у той час як поріг чутливості радіометричних систем модуляційного типу за даними авторів [25, 26] у міліметровому діапазоні не перевищує 10^{-12} Вт.

Таким чином, звертаючи увагу на те, що у теперішній час для радіоканалів зв'язку міліметрового діапазону довжин хвиль невідомо моделей, аналогічних моделі Окамури-Хати, або подібних, а також на особливості поширення сигналів міліметрового діапазону через відкритий простір в умовах міської забудови, більш доцільним є визначення відношення сигнал/завада радіометричними методами та засобами [24-27]. Доцільність такого підходу підтверджується також і економічними факторами.

2.3 Основні принципи та технічна реалізація розробленого методу

Оскільки складові внутрішньосистемної та групової завади мають досить широкий спектр, їх можна вважати шумоподібним сигналом. Величина відношення сигнал/завада (P_S/P_N) є важливою характеристикою каналу зв'язку і визначає швидкість передачі даних через нього. Її вимірювання традиційними методами потребує спеціальної апаратури та значних часових і обчислювальних ресурсів.

Для систем зв'язку мм-діапазону, більш доцільним є використання радіометричного методу, який дозволяє визначати P_S/P_N та інші параметри шумоподіб-

Зінченко, О. В. РІ-711мп, 2018

них широкосмугових сигналів [44]. Даний метод передбачає використання приймача радіометричного типу. Через високу чутливість і точність вимірювань, а також наявність функціональних можливостей найбільш перспективною є модуляційна схема. При виконанні досліджень за темою даної дисертації було використано радіометричну систему мм-діапазону, що розроблена лабораторією мікрохвильової радіометрії. Робочий діапазон зазначеної системи складає 37,5–54 ГГц. Проведений аналіз метрологічних характеристик показує можливість застосування її як вимірювального засобу в запропонованому методі. Як показують попередні дослідження така РС дозволяє визначати величину потужності завад P_N в межах від мінус 100 дБмВт до мінус 30 дБмВт) в робочому діапазоні частот

На рис. 2.9 приведена функціональна схема високочутливої радіометричної системи мм-діапазону, за допомогою якої проводились експериментальні дослідження за темою даної дисертації. Джерелом сигналу Х тут є досліджуване джерело випромінювання або генератор еталонного шуму.

Принцип роботи системи такий: в результаті перемикання її входу модулятором *U1*, загасання якого змінювалось від мінімального (1,5 дБ) до максимального (40 дБ) внаслідок подачі прямокутних імпульсів з виходу генератора *G1*. Таким чином, вхідний шумоподібний сигнал на вході на вході прецизійного атенюатора *A1*, мав амплітудну модуляцію.

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

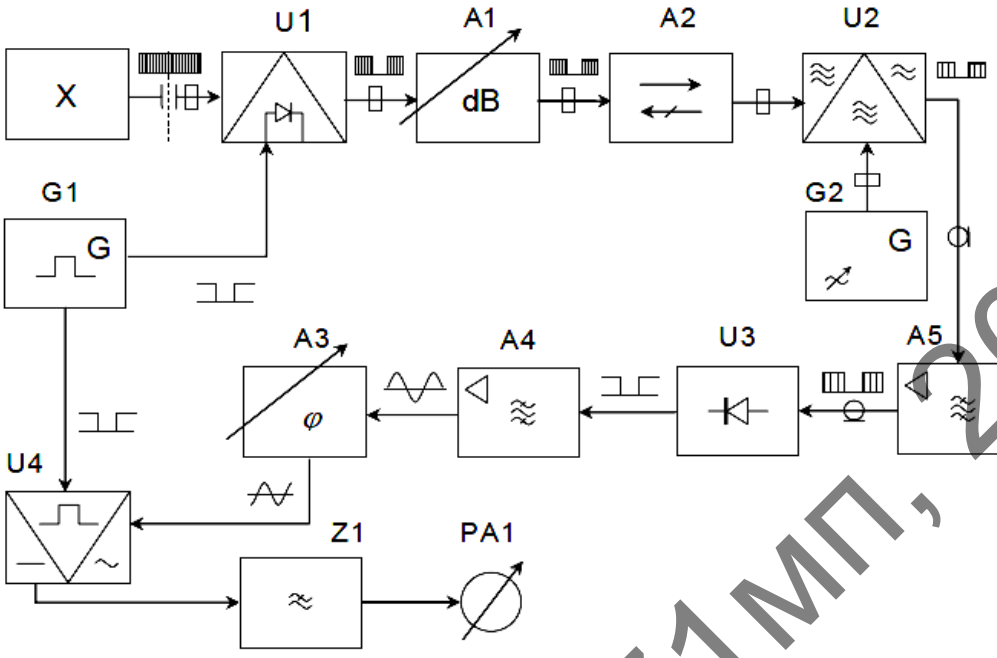


Рисунок 2.9 — Функціональна схема високочутливої радіометричної системи мм-діапазону [26]: *U1* — мікрохвильовий електрично-керований модулятор; *A1* — прецизійний атенюатор; *A2* — феритовий вентиль; *U2* — перетворювач частоти; *G1* — генератор прямокутних імпульсів; *G2* — генератор синусоїдальних мікрохвильових сигналів (гетеродин); *A3* — підсилювач проміжної частоти; *U3* — квадратичний детектор; *A4* — біквадратний смуговий фільтр; *A5* — підсилювач проміжної частоти; *U4* — синхронний детектор; *Z1* — фільтр низьких частот; *PA1* — вольтметр; *X* — джерело сигналу

Вибір частоти модуляції є важливим, оскільки визначає ефективність роботи системи в цілому. Частота модулятора вибирається такою, щоб за один період комутації коефіцієнт передачі радіометричного тракту не міг значно змінитися. Оптимальною є частота 1 кГц (див. наприклад [25, 27]). Глибина модуляції залежить від співвідношення потужності прийнятого та еталонного сигналу. Поляризаційний змінний атенюатор *A1* приємний рівень вхідного сигналу, у разі його перевищення. Відомо, що така НЧ модуляція сигналу зберігається і після квадратичного детектування [24-27]. З виходу атенюатора *A1* модульований мікрохвильовий сигнал поступає на один зі входів перетворювача *U2*, а на другий його вхід поступає сигнал гетеродина *G2*. Феритовий вентиль *A2* забезпечує електродинамічну розв'язку перетворювача та вхідного тракту РС. Вихідний сигнал перетворювача поступає на вхід підсилювача проміжної частоти *A5*, резонансний підси-

Зінченко. О. В. РІ-71мп, 2018

лювач *A4* після детектування детектором *U3* сигналу ПЧ виділяє корисний сигнал з частотою модуляції 1 кГц та зменшує складові флікер-шуму, які створюються після квадратичного перетворення. Далі сигнал частоти 1 кГц через біквадратний фільтр *A4* та фазообертач *A3* подається на синхронний детектор *U4*, керований напругою того ж самого генератора *G1*, що керує роботою модулятора на вході системи. Вихідна напруга *U4* пропорційна різниці сигналів: один з них пропорційний сумі потужностей вхідного шумоподібного сигналу, що вимірюється та власних шумів системи, а другий – потужності власних шумів РС. Величини цих потужностей залежать від смуги робочих частот тракту проміжної частоти ΔF. Як інтегратор використовується ФНЧ *Z1*, що визначає смугу пропускання низькочастотної частини РС, вихідний сигнал якої є постійним, а його напруга, що пропорційна потужності вхідного сигналу, поступає на вхід вольтметру *PA1*.

Поріг чутливості описаної РС сигнал визначається за формулою

$$\Delta P_{KP} = 2\sqrt{2}P_N\sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}.$$

и складає не більше 10^{-13} Вт у смузі частот ПЧ тракту (смуга частот, що аналізується РС, Δf).

Проведені дослідження підтверджують можливість застосування радіометричного методу для оцінки основних характеристик каналу зв'язку мм-діапазону. Зокрема, він може використовуватись для визначення рівню завад у мобільних мережах п'ятого покоління. Технічним засобом запропонованого методу може бути діюча радіометрична система з порогом чутливості 10^{-14}– 10^{-13} Вт (у діапазоні частот, що аналізуються). Це дозволяє вимірювати зазначену величину з відносною похибкою 5-10 %.

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ РАДІОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ

Розроблений радіометричний метод дозволяє визначити рівень завад та інших широкосмугових сигналів міліметрового діапазону з вхідною потужністю від 10^{-13} до 10^{-6} Вт у смузі робочих частот приймача. У розділі 2 було показано, що за допомогою даного методу можна не тільки зафіксувати наявність електромагнітного випромінювання, а також відслідковувати зміну його інтенсивності у часі.

Оскільки подальший розвиток систем зв'язку, і насамперед, радіомереж 5G передбачає використання каналів мм-діапазону, що не потрібують ліцензування, то основні експериментальні дослідження і комп'ютерне моделювання проводились у частотному діапазоні діапазоном 37-53 ГГц.

3.1 Комп'ютерне моделювання спектрів сигналів та завад та визначення характеристик радіоканалу

Метою комп'ютерного моделювання було визначення основних параметрів сигналів та завад у радіомережах мм-діапазону та оцінка можливості застосування розробленого радіометричного методу. Під час його проведення застосовано програмний пакет *MatLab 2018* з розширенням *Toolbox 5G*, які дозволяють проводити аналіз і тестування систем зв'язку 5G на фізичному рівні, тобто надають можливість досліджувати процес поширення сигналів у радіоканалі [45, 46]. До складу розширення *Toolbox 5G* входять комп'ютерні моделі основних компонентів радіомереж та радіоканалу, які відповідають стандарту 3GPP 5G New Radio (NR) [9], а також приклади програмної реалізації на мові пакету *MatLab* генерувальних та приймальних пристроїв. На рисунку 3.1 наведено схему комп'ютерного моделювання передачі інформаційних сигналів через радіоканал [46], яка використовувалась під час проведених досліджень.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

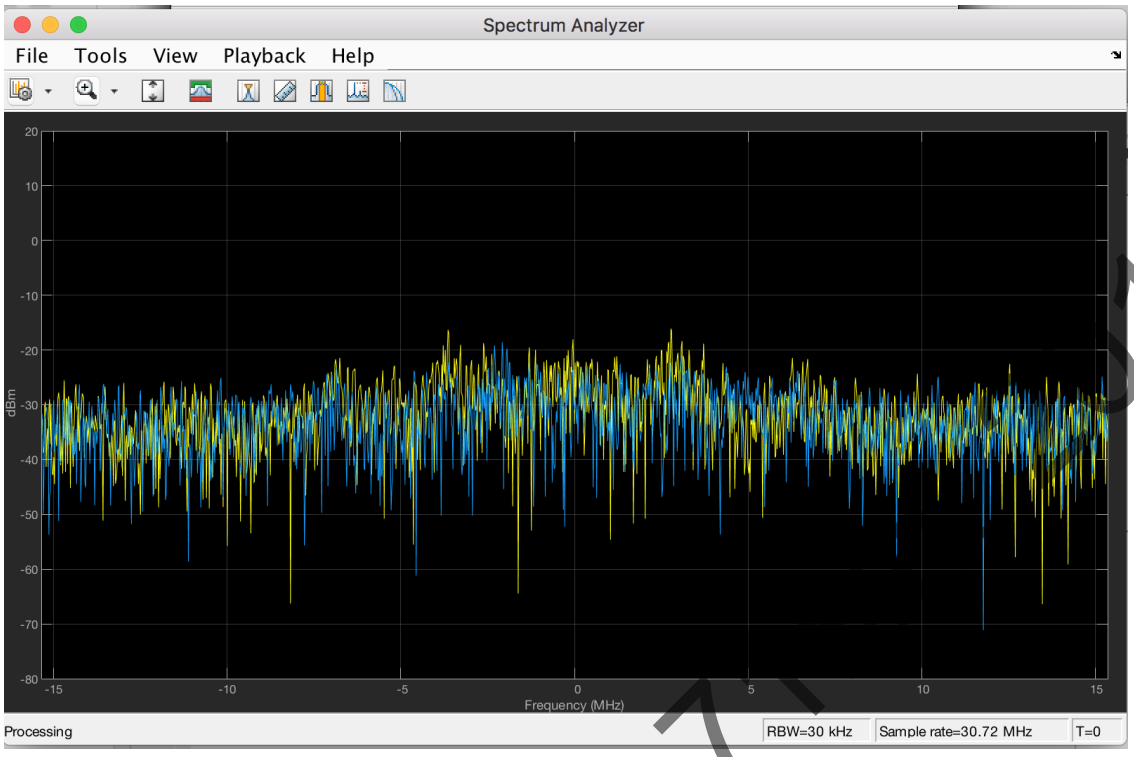
У процесі моделювання у програмному модулі *Burst generation* була задана типова форма OFDM сигналу для систем мобільного зв'язку [46], а кількість передавальних та приймальних антен складала відповідно 8 і 2.

Рисунок 3.1 — Структурна схема моделі передачі інформаційних сигналів у середовищі Matlab 2018b: *Burst generation* – пристрій формування OFDM сигналу; *Beam sweep* – антенна із системою керування напрямом випромінювання; *Propagation channel* – каналу зв'язку (модель TDL); *AWGN* – модель джерела гаусова шуму; *Receiver* – приймальна система

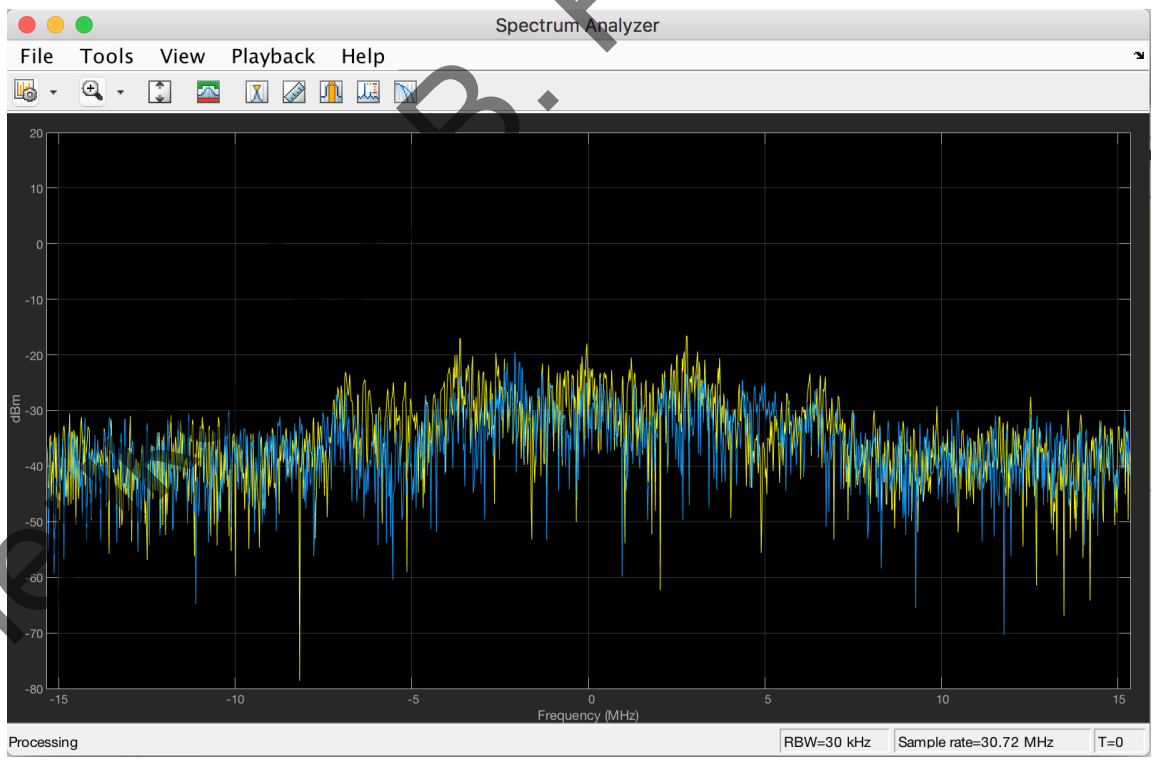
Для зменшення часу обчислювального процесу та раціонального використання апаратних ресурсів ПК смуга частот інформаційного сигналу задавалась у межах 15 МГц, а смуга частот, у який проводився аналіз — $f_0 \pm 30$ МГц (де f_0 — центральна частота). Модель каналу передачі даних *Propagation channel* відповідала стандарту радіоінтерфейсу NR для систем зв'язку 5G.Для джерел шуму *AWGN* відношення сигнал / шум дорівнювало 20 дБ, а для приймальної антени це відношення було змінною величиною, яка задавалась під час моделювання. У блоці приймача *Receiver* реалізовані процеси синхронізації та демодуляції, що застосовуються у реальній апаратурі такого класу для заданої форми сигналу, щоб встановити ідентифікацію та декодувати основний інформаційний блок (MIB) прийнятого сигналу. Листинг програми, що описую форму прийнятого сигналу приведено у додатку В. Спектр прийнятого відображався за допомогою віртуального аналізатора спектру [46].

У процесі моделювання проведено порівняння спектрів сигналу на вході приймача для різних значень відношення сигнал/шум, яке задавалось в інтервалі 5 – 50 дБ На рис. 3.2 та 3.3 приведено вид спектрів прийнятих сигналів для значень сигнал/шум: 5, 10, 20 та 50 дБ.

Зінченко. О. В. РІ-71мп, 2018



а

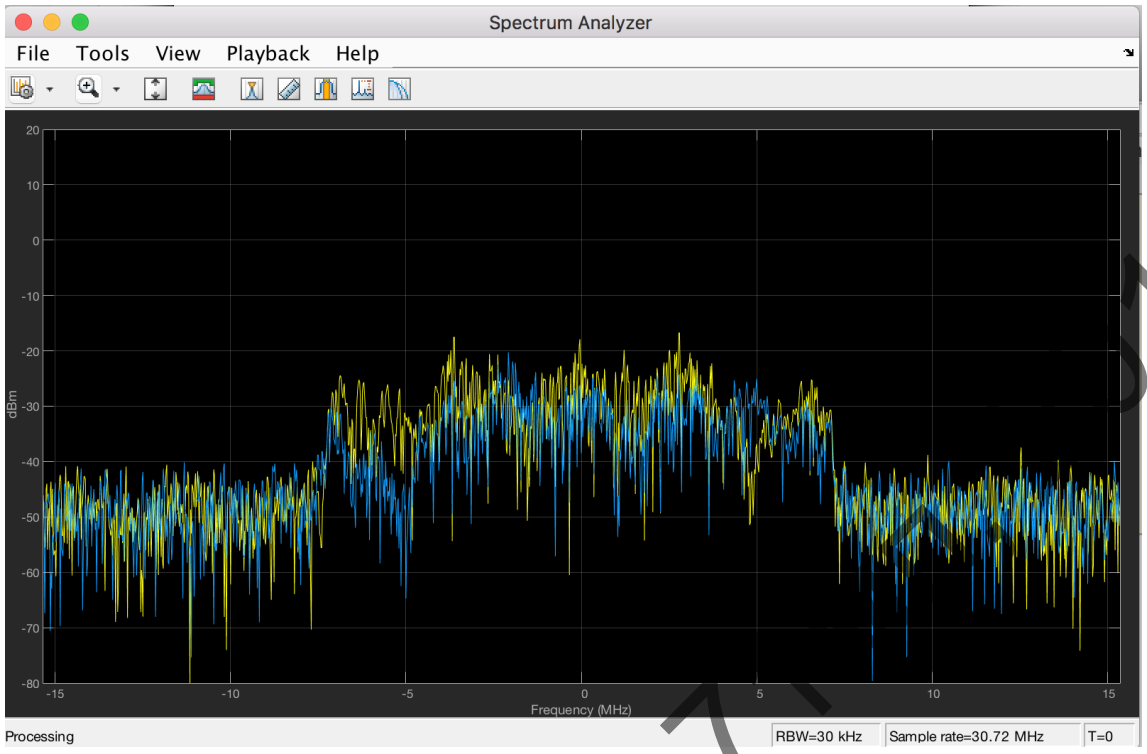


б

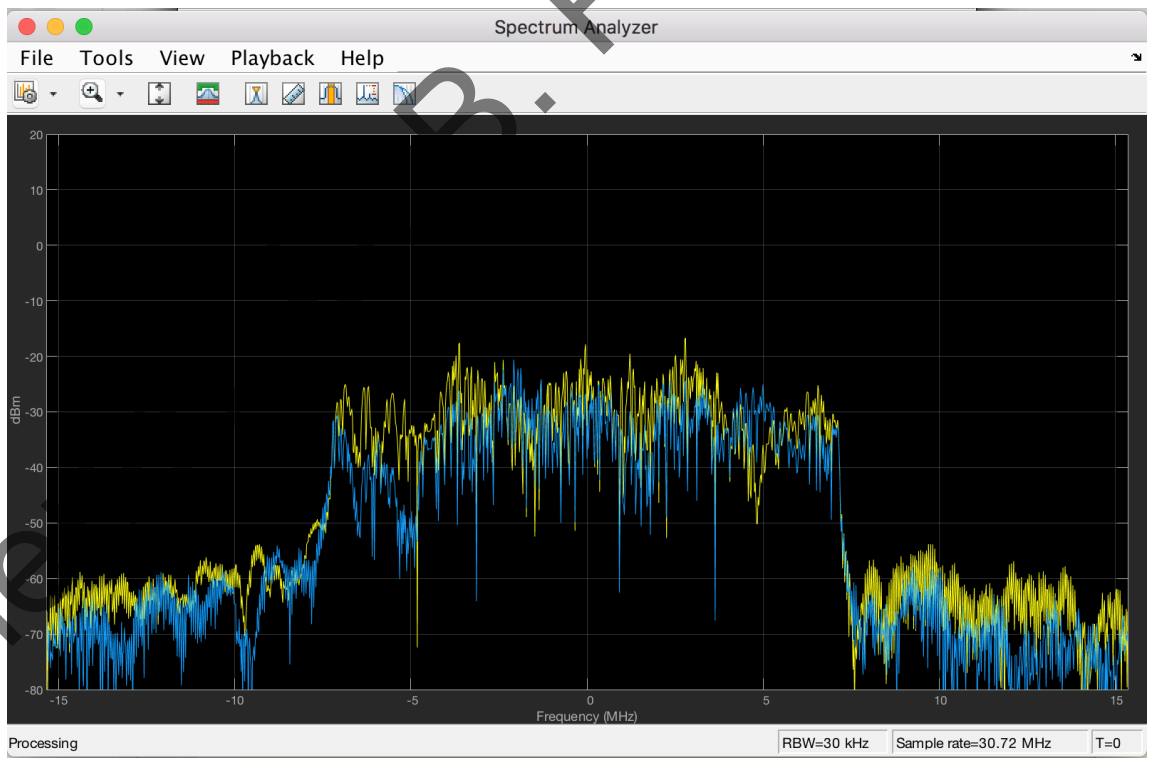
Рисунок 3.2 — Спектр сигналу на вході приймача для відношення сигнал шум:

а — 5 дБ, *б* — 10 дБ

Зінченко В. РІ-71 2018



а



б

Рисунок 3.3 — Спектр сигналу на вході приймача для відношення сигнал шум: *а* — 20 дБ, *б* — 50 дБ

Зінче... В. Pl-7... 18

Як видно з приведених графіків інформаційний сигнал на вході приймача після проходження радіоканалу з гаусовим шумом стає помітним на аналізаторі спектру, якщо його потужність перевищує рівень шуму більше ніж на 20 дБ. При цьому рівень шумів у каналі зв'язку може бути від 10^{-13} до 10^{-6} Вт. За формою спектру інформаційний сигнал схожий на шумовий у смузі робочих частот (підканалу), виділеної для одного МТ. Крім того, з наведених спектрограм видно, що типова потужність інформаційного сигналу складає 10^{-6} Вт (відповідно СЩП — $5 \cdot 10^{-14}$).

Таким чином, можна вважати, що сигнали, які поширюються у радіоканалі систем зв'язку 5G мають шумоподібний характер. Проте, слід взяти до уваги, що моделювання, проведене у середовищі Matlab, можна віднести для типових стандартних умов. В реальних каналах зв'язку спектр сигналу може бути ще більш схожим на шумовий через, наприклад, багаторазові відбиття від різноманітних перешкод.

З врахуванням отриманих під час моделювання результатів, було проведено експериментальну перевірку розробленого методу

3.2 Оцінка точності вимірювання параметрів завади радіометричним методом

3.2.1 Дослідження впливу метрологічних характеристик радіометра на точність вимірювань

Звертаючи увагу на результати аналітично огляду, що приведені у розділі 1, та моделювання, для експериментальної перевірки розробленого радіометричного методу вирішено використовувати радіометричну систему мм-діапазону, що розроблена у лабораторії мікрохвильової радіометрії под. керівництвом проф. Яненка О.П. (рис. 2.9).

Схема експериментальної установки представлена на рис. 3.4. Основною її частиною була високочутлива радіометрична система модуляційного типу *РС*, на вході якої для розширення динамічного діапазону встановлено поляризаційний

Зінченко О. В. РІ-71мп. 2018

атенюатор *A* (Д3-37), до якого через хвилеводний перемикач *S* підключались генератори еталонного шуму *G1* або гармонічних коливань *G2* (Г4-141) та приймальна рупорна антена *X1* для приймання тестового сигналу. Даний сигнал формувався генератором хитної частоти *G3* (який входить до складу панорамного вимірювача КСХН та ослаблень Р2-69) та вузькосмугового хвилеводного фільтру Z. Створений таким чином мав частотну смугу приблизно 300 МГц та інтегральну потужність біля 1 мкВт, що відповідає умовам проведеного комп'ютерного моделювання. Він через передавальну антену *X2* випромінювався та приймався антеною *X1*.

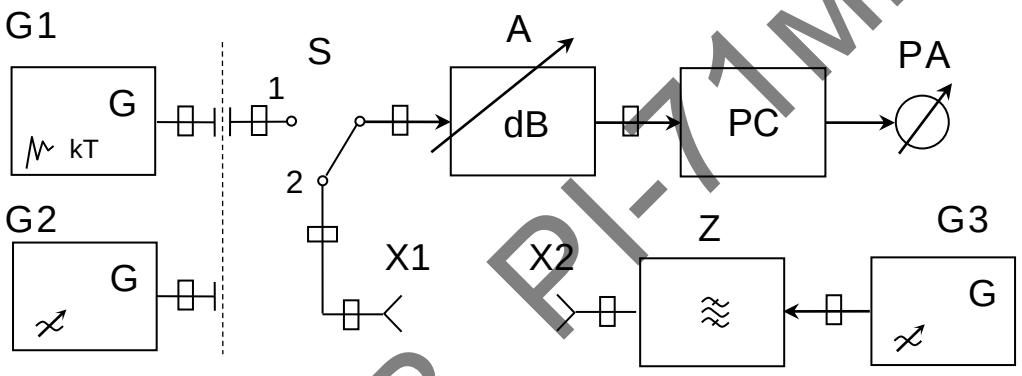


Рисунок 3.4 – Схема експериментальної установки

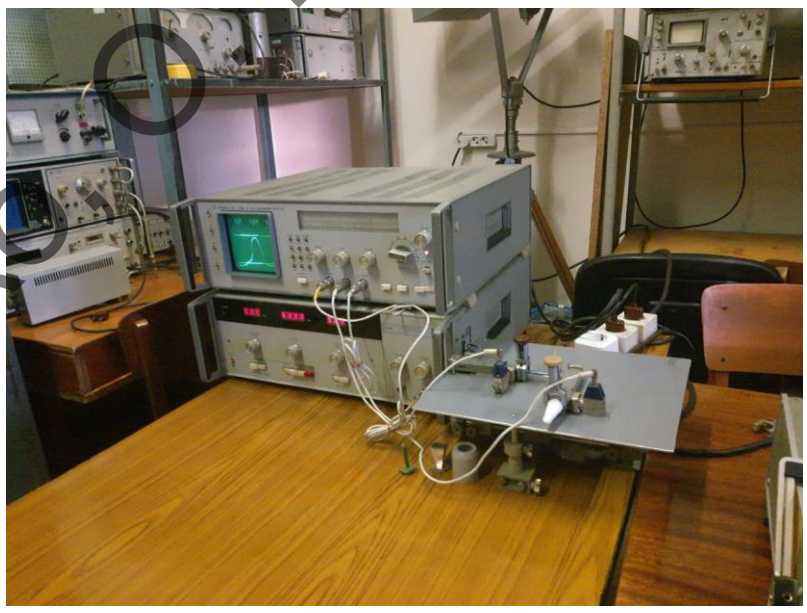


Рисунок 3.5 – Передавальна система експериментальна установка

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

Для зменшення впливу похибки РС на результати вимірювань, через дрейф нуля, перед проведенням вимірювань параметрів сигналів проводилось її градуювання РС за допомогою генератору еталонного електромагнітного шуму (ГЕШ), атестованого у Національному науковому центрі «НДІ метрології» (м. Харків). ГЕШ з'єднувався зі входом атенюатора *А* (перемикач *S* встановлювався у положення *1*).

У таблиці 3.1 приведені усереднені значення напруги РА1 за результатами багатократних спостережень. Кількість спостережень дорівнювала 500, що дозволяло суттєво зменшити випадкову складову похибки вимірювань і не враховувати її при обробці результатів.

В останньому рядку приведені значення надлишкової СЩПШ (*p*) сигналу [32], що приймається РС, розраховані за формулою

$$p_A = \frac{p' - p_0}{10^{A/10}},$$

де $p' = 4,73 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц та p_0 – СЩПШ відповідно ГЕШ та вхідного тракту РС; А – показник атенюатора у дБ.

Таблиця 3.1 — Залежність вихідної напруги від СЩПШ вхідного сигналу для частоти 47 ГГц

А, дБ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U, В	0,88	0,78	0,68	0,54	0,48	0,35	0,30	0,22	0,16	0,13	0,10	0,04	0,04
СЩПШ Вт/Гц · 10^{-22}	6,2	5,0	3,9	3,1	2,5	2,0	1,5	0,94	0,75	0,60	0,47	0,38	0,30

Як видно з таблиці поріг чутливості складає $(3,8-4,7)\cdot 10^{-23}$ Вт/Гц (2-3 К), а за інтегральною потужністю (у смузі частот Δf) — 10^{-14} Вт. Такі метрологічні характеристики дозволяють досить точна вимірювати рівень шумоподібних сигналів, зокрема завад у радіоканалі зв'язку. Фактично поріг чутливості РС набагато менший за рівень зазначених завад. Тому похибка вимірюваня їх СЩП визначається похибкою вимірювань сигналів, потужність яких складає від 10^{-12} до 10^{-6}

Зінченко О. В. РІ-71мп. 2018

Вт. За оцінками, приведеними в літературі вона складає від 5% до 10% за наявністю засобів градуювання РС, зокрема ГЕШ.

3.2.2 Дослідження впливу передаточної характеристики

На точність вимірювань суттєво впливає передаточна характеристика РС. На рис. 3.5–3.7 приведено вигляд такої характеристики РС, що використовувалась для експериментальних досліджень, для трьох значень частот: 42, 47 та 53 ГГц. З графіків видно, що вона не є лінійною, проте у певному діапазоні значень вхідної потужності її можна вважати такою. Особливо це стосується частоти 53 ГГц, яку можна апроксимувати прямою лінією при зміні СЩП від $3 \cdot 10^{-22}$ до $3{,}5 \cdot 10^{-23}$ (Вт/Гц), що перевищує динамічний діапазон в 10 дБ.

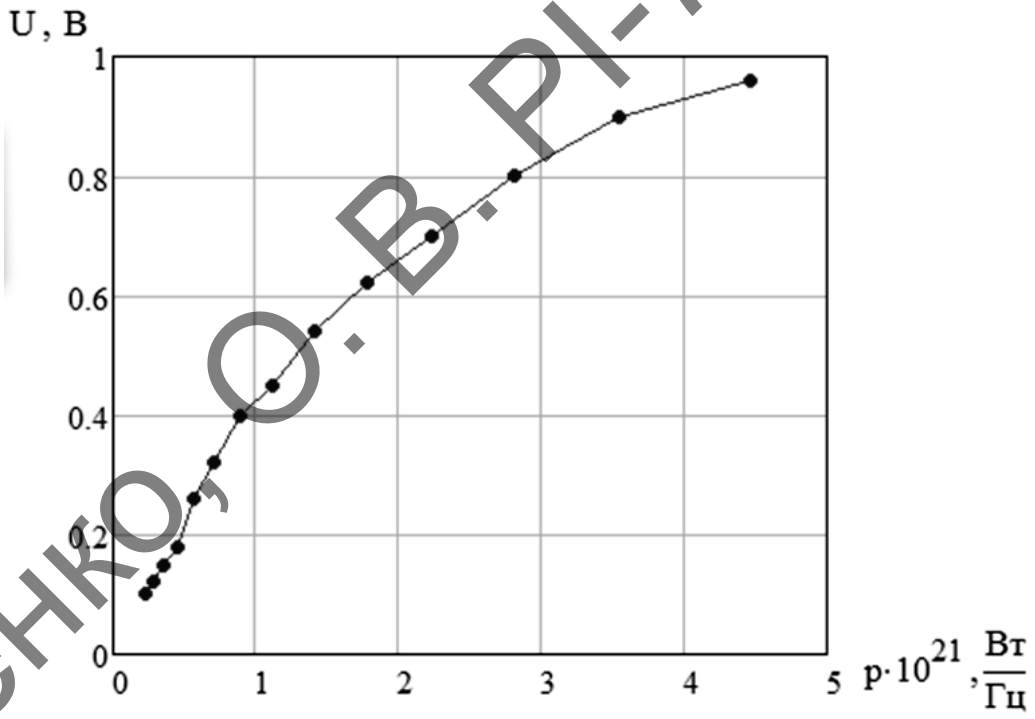


Рисунок 3.6 — Передаточна характеристика РС для частоти 42 ГГц

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

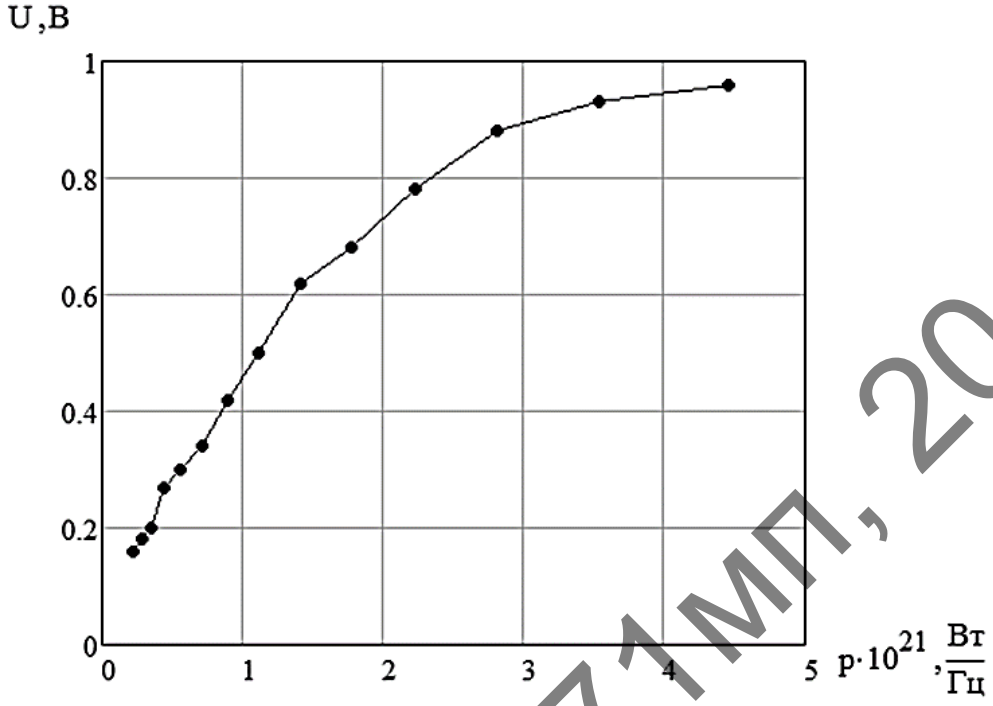


Рисунок 3.7 — Передаточна характеристика РС для частоти 47 ГГц

Використання РС з лінійною передаточною характеристикою дозволяє більш точно визначати параметри радіосигналів, і, відповідно, характеристики каналу зв’язку.

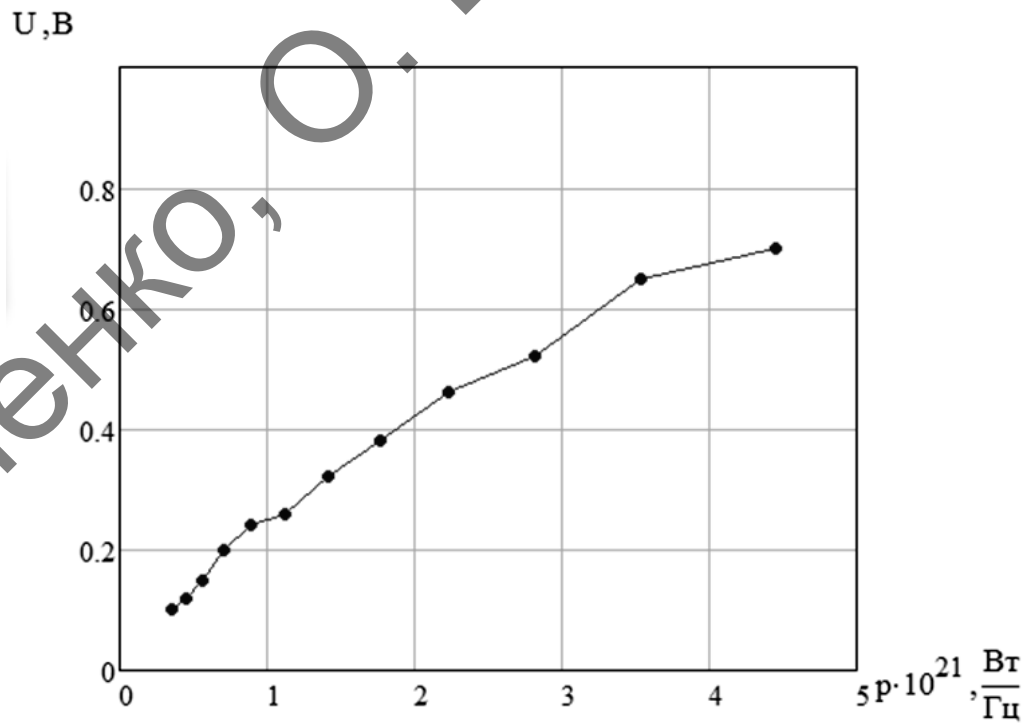


Рисунок 3.8 — Передаточна характеристика РС для частоти 53 ГГц

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

Слід зазначити, що на частотну залежність передаточної характеристики РС значно впливають параметри тракту ПЧ. Для визначення частотної залежності коефіцієнта передачі РС було використано вимірювальний генератор Г4-141 (*G2*), вихідний сигнал якого через атенюатор *A* надходив до входу РС (рис. 3.4). Хвилеводний перемикач *S* при цьому встановлено у положення 1. На рис. 3.8 приведено експериментально визначену залежність напруги індикатора РА від частоти.

Потужність вхідного сигналу при цьому була постійною. Звертаючи увагу на практично лінійну залежність коефіцієнта передачі для частоти 53 ГГц, можна визначити, що смуга пропускання тракту ПЧ, а відповідно, смуга частот, що аналізуються РС, складає приблизно 250-270 ГГц за половинним рівнем потужності. Крім того, нерівномірність характеристики у даній смузі впливає на точність вимірювання параметрів сигналів із застосуванням радіометричного методу, зокрема визначення їх залежності від частоти.

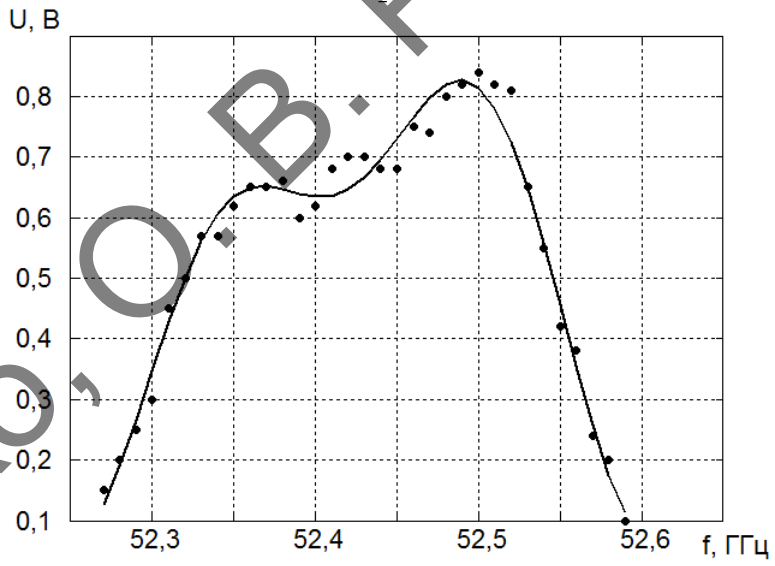


Рисунок 3.9 — Частотна залежність вихідної напруги індикатора РС від частоти гармонічного вхідного сигналу

3.2.3 Експериментальна оцінка точності методу

Оцінка точності розробленого методу були проведені експериментальні дослідження з використанням експериментальної установки, структурна схема якої приведена на рис. 3.4. Хвилеводний перемикач *S* встановлювався у положення 2, і

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

вихід приймальної антени *X1* з'єднувався зі входом РС через атенюатор *A*. На вхід зазначеної антени надходив сигнал, сформований генератором *G3* та фільтром *Z* та випроменений антеною *X2*. Спектр цього сигналу представлений на рис. 3.9. Як видно, смуга частот за половинним рівнем потужності складає близько 0,3 ГГц.

На рис. 3.10 приведено спектр цього сигналу, виміряного радіометричною системою після поширення у повітрі. Як видно спектр сигналу розширився більше ніж удвічі і складає близько 0,5 ГГц. Тобто збільшився приблизно на ширину робочої смуги частот ПЧ тракту або, що одне й теж, на смугу частот, що аналізуються РС. Крім того, видно що його форма нагадує спектральну характеристику РС (рис. 3.8).

Таким чином, можна стверджувати, що точність визначення частоти сигналів задається смугою робочих частот тракту ПЧ, тобто Δf .

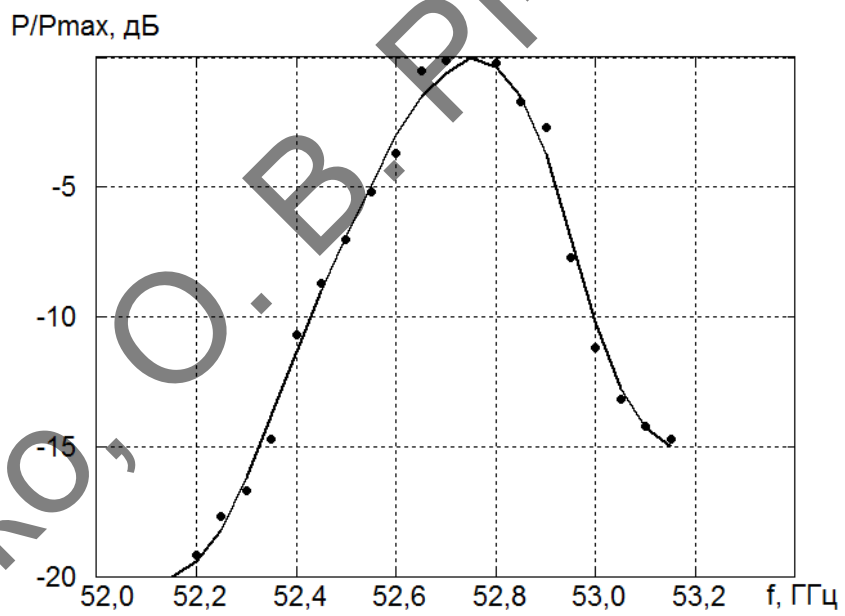


Рисунок 3.10 — Спектр вихідного сигналу генератора передавача (ГКЧ Р2-69)

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

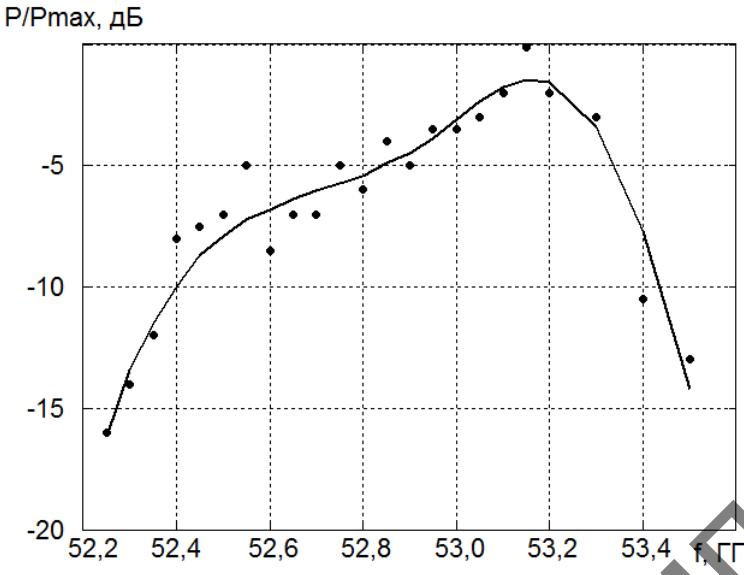


Рисунок 3.11 — Спектр сигналу, виміряного радіометричною системою

Таким чином, можна зробити висновок, що запропонований радіометричний метод, призначений для дослідження характеристик шумоподібних сигналів, можна використовувати для визначення рівня завад у каналі зв'язку міліметрового діапазону. Для існуючих радіометричних систем даного діапазону частот він здатний забезпечувати вимірювання потужності завад у межах від 10^{-13} до 10^{-6} Вт з похибкою 5-10%. До таких завад, насамперед, слід віднести внутрішньсистемні та групові завади у радіомережах.

Розроблений метод можна використовувати також і для визначення форми інформаційних сигналів. Проте, необхідно зазначити, що використання у ньому існуючих радіометричних систем обмежує точність визначення частоти шириною робочого діапазону частот тракту ПЧ. Цей недолік можна частково усунути технічними рішеннями. Наприклад, встановити на вході ППЧ смуговий фільтр, діапазон робочих частот (Δf) якого є електрично керованим. Оскільки поріг чутливості РС пропорційний $1/\sqrt{\Delta f}$, то при вимірювання відносно слабких сигналів завад Δf можна збільшувати, а при вимірюванні параметрів сигналів — зменшувати, тобто підвищувати точність визначення частоти.

Зінченко, О. В. РІ-711мп, 2018

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Проведена оцінка відповідності шкідливих і небезпечних факторів, що виникають при роботі з електронними та обчислювальними пристроями в науково-дослідній лабораторії радіотехнічного факультету НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, санітарним нормам і вимогам техніки безпеки.

В даному розділі визначені основні потенційно небезпечні та шкідливі виробничі виробничі фактори що можуть мати місце в розробці радіометричного методу. Також запропоновані технічні рішення та організаційні заходи із гігієни праці, виробничої санітарії та техніки безпеки та визначені основні заходи безпеки в надзвичайних ситуаціях.

4.1 Визначення основних потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів при виконанні науково-дослідницької роботи

В даній магістерській дисертації виконуються моделювання та оптимізація роботи радіометричного методу за допомогою персональної електронно–обчислювальної машин (ПЕОМ). При роботі на ПЕОМ людина піддається впливу іонізуючого, інфрачервоного й ультрафіолетового випромінювань екрана монітора, рівні яких повинні відповідати вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з ВДТ ПЕОМ».

При проведенні повного циклу робіт з проектування потенційно-небезпечними та шкідливими факторами можуть бути:

- наявність шкідливих випромінювань ПЕОМ;
- можливість ураження електричним струмом;
- підвищений рівень шуму;
- невідповідність освітлення санітарним нормам;
- несприятливі мікрокліматичні умови;
- можливість виникнення НС.

Розглянемо вплив цих факторів більш детально.

Зінченко О. В. РІ-71мп. 2018

4.2 Технічні рішення та організаційні заходи із гігієни праці, виробничої санітарії та техніки безпеки

4.2.1 *Електробезпека*

Згідно ОНТП24-86 та ПУЕ науково-дослідницька лабораторія відноситься до приміщень без підвищеного ризику. Електроустаткування належить до приладів до 1000 В. Устаткування, що використовується, відповідно до ГОСТ 12.2.007.0-75 належить до устаткування класів 0I, I та II за електрозахистом.

У процесі експлуатації електронно-обчислювального обладнання людина може доторкнутися до частин електроустаткування, які перебувають під напругою. Оцінка небезпеки дотику до струмоведучих частин відноситься до визначення сили струму, що протікає через тіло людини, і порівняння його із допустимим значенням відповідно до ГОСТ 12.1.038-88. У загальному випадку допустима величина струму, що протікає через тіло людини, залежить від схеми підключення електроустаткування до електромережі, роду й величини напруги живлення, схеми включення.

При виконанні розрахунків для дипломного проекту використовувався персональний комп'ютер – I (системний блок) і II ВДТ класів за електрозахистом, що живиться напругою 220 В.

Для правильного визначення необхідних засобів та заходів захисту від ураження електричним струмом необхідно знати допустимі значення напруг доторкання та струмів, що проходять через тіло людини.

Гранично допустимі значення напруги доторкання та сили струму для нормального (безаварійного) та аварійного режимів електроустановок при проходженні струму через тіло людини по шляху «рука – рука» чи «рука – ноги» регламентуються ГОСТ 12.1.038-88

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

Таблиця 4.1 — Граничнодопустимі значення напруги доторкання та сили струму, що проходить через тіло людини при нормальному режимі електроустановки

Вид струму	$U_{доп}$, В(не більше)	$I_л$, мА (не більше)
Змінний, 50 Гц	2	0,3
Змінний, 400 Гц	3	0,4
Постійний	8	1,0

Граничнодопустимі значення сили струму (змінного та постійного), що проходить через тіло людини при тривалості дії більше ніж 1 с нижчі за пороговий невідпускаючий струм, тому при таких значеннях людина, доторкнувшись до струмопровідних частин установки, здатна самостійно звільнитися від дії електричного струму.

Таблиця 4.2 — Гранично допустимі значення напруги доторкання U та I, що проходять через тіло людини при аварійному режимі електроустановки

Вид струму	Нормоване значення	Тривалість дії струму t, с					
		0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	>1,0
Змінний, 50 Гц	$U_{доп}$, В	500	250	100	70	50	36
	$I_л$, мА	500	250	100	70	50	6
Постійний	$U_{доп}$, В	500	400	250	230	200	40
	$I_л$, мА	500	400	250	230	200	15

Основними технічними засобами, що забезпечують безпеку робіт (згідно ПУЕ-87, ГОСТ 12.1.009-76) є: надійна ізоляція, захисне заземлення, занулення, захисне відключення, засоби індивідуального захисту. У системі трифазних мереж із глухо заземленою нейтраллю, яка використовується у науково-дослідницькій лабораторії, найкращими засобами захисту є: надійна ізоляція струмоведучих частин електроустаткування відповідно до ГОСТ 12.1.009-76 і занулення відповідно до ПУЕ (з'єднання елементів, що перебувають під напругою, із глухо заземленою нейтраллю). Крім того, для заземлення переносних частин обладнання застосовують спеціальне з'єднання.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

4.2.2 *Розрахунок захисного відключення електромережі при аварійном режимі роботи електрообладнання*

Виконаємо розрахунок ланцюга захисного відключення фазного проводу при короткому замиканні (КЗ). Струм КЗ можна обчислити за формулою:

$$I_{КЗ} = \frac{U_Ф}{R_0 + R_Ф + Z_{ТР}}$$

де UФ = 220 В - напруга фазного проводу;

R0 = 3 Ом - опір нульового проводу;

RФ = 7 Ом - опір фазного проводу;

ZТР/3 ≅ 0,1 Ом - еквівалентний опір трансформатора.

$$I_{КЗ} = \frac{220}{3 + 7 + 0{,}1} = 21{,}78\ A$$

Струм спрацьовування автоматів захисту з електромагнітним розпилювачем повинен бути в 1,4 рази менше струму короткого замикання при струмі до 100 А

$$I_{спр} < \frac{21{,}78}{1{,}4} < 15{,}6\ A$$

Таким чином, струм спрацьовування автомата повинен бути менше 15,6 А. Автомат струмового захисту задовольняє даній умові.

Розрахуємо напругу дотику до корпусів електрообладнання при короткому замиканні:

$$U_{ДОТ} = I_{КЗ} R_0 = 21{,}78 \cdot 3 = 65{,}34\ B$$

Відповідно до ГОСТ 12.1.038-88, щоб ця напруга була безпечна для людини, необхідно використовувати автомати максимально струмового захисту у яких час спрацьовування менше 0,8с.

Автомати максимально струмового захисту, встановлені у науково-дослідницькій лабораторії задовольняє даній умові ($t_{спр}$< 0,1 с.).

Із проведених розрахунків видно, що у науково-дослідницькій лабораторії основним захистом від поразки електричним струмом є занулення та застосування пристроїв максимального струмового захисту.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

4.2.3 ***Вимоги до організації безпечних та комфортних умов праці на робочих місцях користувачів ВДТ ПЕОМ***

ДСанПіН 3.3.2.007-98 "Державні санітарні норми і правила роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) електронно-обчислювальних машин" встановлює норми щодо забезпечення охорони праці користувачів ПК. Дотримання вимог цих правил може значно знизити наслідки несприятливої дії на працівників шкідливих та небезпечних факторів, які супроводжують роботу з відеодисплейними матеріалами, зокрема можливість зорових, нервово-емоційних переживань, серцево-судинних захворювань.

Для того щоб забезпечити точне та швидке зчитування інформації в зоні найкращого бачення, площина екрана монітора виставлена перпендикулярно нормальній лінії зору. При цьому передбачена можливість переміщення монітора навколо вертикальної осі в межах ±30° (справа наліво) та нахилу вперед до 85° і назад до 105° з фіксацією в цьому положенні. Клавіатура розміщена на поверхні столу на відстані 100 .300 мм від краю. Кут нахилу клавіатури до столу обрано в межах від 5 до 15° так, що зап'ястя на долонях рук розташовуються горизонтально до площини столу. Таке положення клавіатури зручне для праці обома руками. Робочі місця з ПК розташовано відносно від стіни з вікнами на відстані не менше 1,5м, від інших стін — на відстані 1 м, відстань між собою – не менше ніж 1,5 м. Причому так, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски з поверхні екранів ПК передбачені сонцезахисні жалюзі.

Штучне освітлення робочого місця, обладнаного ПК, здійснюється системою загального рівномірного освітлення. Як джерело штучного освітлення мають застосовуватись люмінесцентні лампи ЛБ.

Вимоги до освітлення приміщень та робочих місць під час роботи з ПК:

- освітленість на робочому місці повинна відповідати характеру зорової роботи, який визначається трьома параметрами: об'єктом розрізнення – найменшим розміром об'єкта, що розглядається на моніторі ПК; фоном, який характеризується коефіцієнтом відбиття; контрастом об'єкта і фону;

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

- необхідно забезпечити достатньо рівномірне розподілення яскравості на робочій поверхні монітора, а також в межах навколишнього простору;
- на робочій поверхні повинні бути відсутні різкі тіні;
- в полі зору не повинно бути відблисків (підвищеної яскравості поверхонь, які світяться та викликають осліплення);
- величина освітленості повинна бути постійною під час роботи;
- Тривалість регламентованих перерв під час роботи з ЕОМ становить 10 хвилин через кожну годину роботи .

Для зниження нервово-емоційного напруження, втомленості зорового аналізатора, для поліпшення мозкового кровообігу і запобігання втомі доцільно деякі перерви використовувати для виконання комплексу вправ, які передбачені ДСанПіН 3.3.2.007-98.

4.2.4 ***Мікроклімат робочої зони***

Мікроклімат у виробничих умовах визначається наступними параметрами: температурою повітря, відносною вологістю повітря, швидкістю руху повітря й інтенсивністю теплового випромінювання на робочому місці, температурою поверхні.

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюють оптимальне й припустиме значення параметрів мікроклімату залежно від періоду року й категорії робіт. У таблиці наведені оптимальні й припустимі значення параметрів мікроклімату для категорій тяжкості робіт «Іа» (роботи, виконувані сидячи й не потребуючі фізичної напруги при витраті енергії не більше 120 ккал/година).

У приміщенні використовується 6-ти секційна чавунна батарея центрального опалення для підтримки нормальної температури повітря в холодну пору року. Також є кондиціонер для підтримки постійної температури в приміщенні. Для підтримки необхідних параметрів повітря в приміщенні використовується природна вентиляція.

Таблиця 4.3 — Оптимальні й допустимі параметри мікроклімату в приміщенні

Зінченко. О. В. РІ-71мп, 2018

Параметри	Холодний період		Теплий період	
	оптимальні	допустимі	оптимальні	допустимі
Температура ^{0}C	22-24	21-25	23-25	22- 28
Відносна вологість, %	40-60	80	40-60	75
Швидкість руху повітря, м/с	0,1	0,1	0,1	0,1-0,2

У приміщенні є вікно, яке можна відкривати, якщо буде потреба в теплий період і кватирка - відкривається в холодний період. Шкідливі речовини в приміщенні не зберігаються й не використовуються.

Фактичні параметри мікроклімату в робочій зоні відповідають приведеним вище нормам ДСН 3.3.6.042–99.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в надзвичайних ситуаціях регламентується ПЛАС. Одними з основних складових ПЛАС є розробка технічних рішень та організаційних заходів з евакуації та оповіщення виробничого персоналу і його дій у разі виникнення надзвичайної ситуації, а також основних заходів з пожежної безпеки.

4.3.1 ***Вимоги щодо організації ефективної роботи систем оповіщення персоналу у разі виникнення небезпечної ситуації***

Оповіщення виробничого персоналу у разі виникнення НС, наприклад при пожежі, здійснюється відповідно до вимог НАПБ А.01.003-2009. Необхідність обладнання виробничих приміщень певним типом СО визначається згідно з додатком Е до ДБН В.1.1-7-2002 "Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва".

При обладнані виробничих будівель системою оповіщення, їх необхідно поділяти на зони оповіщення з урахуванням об'ємно-планувальних рішень будинків, шляхів евакуації, поділення на протипожежні відсіки тощо, а також з урахуванням вимог, що наведені в примітці 1 таблиці Е.1 додатка Е до ДБН В.1.1-7-2002.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

Розміри зон оповіщення, черговість оповіщення та час початку оповіщення людей в окремих зонах визначаються, виходячи з умов забезпечення безпечної та своєчасної евакуації людей у разі виникнення НС.

Оповіщення про НС та управління евакуацією людей здійснюється оним з наступних способів або їх комбінацією:

- поданням звукових і (або) світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;
- трансляцією текстів про необхідність евакуації, шляхи евакуації, напрямок руху й інші дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей;
- трансляцією спеціально розроблених текстів, спрямованих на запобігання паніці й іншим явищам, що ускладнюють евакуацію;
- розміщенням знаків безпеки на шляхах евакуації згідно з ДСТУ ISO 6309;
- ввімкненням евакуаційних знаків "Вихід";
- ввімкненням евакуаційного освітлення та світлових покажчиків напрямку евакуації;
- дистанційним відкриванням дверей евакуаційних виходів;
- потім оповіщення людей про пожежу на поверхах, що розташовані вище поверху, де виникла пожежа;
- в останню чергу, оповіщення людей про пожежу на поверхах, що розташовані нижче поверху, де виникла пожежа.

Затримку часу оповіщення про НС/пожежу для різних поверхів будинку необхідно передбачати з урахуванням злиття потоків людей на шляхах евакуації відповідно до розрахунків по ГОСТ 12.1.004 "ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования".

У багатоповерхових виробничих будівлях, які поділені на протипожежні відсіки по вертикалі, СО повинна вмикатися одразу для всього протипожежного відсіку, де виникла пожежа. Затримку часу оповіщення про НС пожежу для інших вертикальних протипожежних відсіків будинку слід передбачати з урахуванням злиття потоків людей на шляхах евакуації відповідно до вимог додатка 2 згідно ГОСТ 12.1.004

Зінченко, О. В. РІ-71мп., 2018

4.3.2 ***Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації.***

У разі виникнення надзвичайної ситуації (НС) працівник, який її поміт- тив, повинен негайно повідомити про це засобами зв'язку органи ДСНС та Державну пожежну охорону, вказати при цьому адресу кількість поверхів, місце виникнення НС, наявність людей, а також своє прізвище;

Керівник та пожежна охорона установи, яким повідомлено про виник- нення НС, повинні:

- перевірити, чи викликані підрозділи ДСНС та підрозділи Державної пожежної охорони;
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;
- у разі загрози життю людей негайно організувати їх евакуацію та їх ря- тування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації наслідків НС;
- перевірити здійснення оповіщення людей про НС;
- забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які беруть участь у ліквідації наслідків НС;
- організувати зустріч підрозділів ДСНС, надати їм допомогу у локалізації та ліквідації НС.

Після прибуття на пожежу підрозділів ДСНС повинен бути забезпечений безперешкодний доступ їх до місця, де виникла НС.

4.3.3 ***Пожежна безпека***

У науково-дослідницькій лабораторії знаходиться значна кількість твердих горючих речовин і матеріалів (дерев'яні меблі, пластмасові вироби, гума, папір, що поглинає покриття на стінках). Згідно НАПБ Б.03.002-2008 «Визначення категорій приміщень та споруд з вибухопожежної та пожежної безпеки», науково-дослідницька лабораторія відноситься до пожежонебезпечних приміщень категорії В (тверді горючі й важкогорючі речовини й матеріали, речовини й матеріали, які при взаємодії з водою, киснем, повітря або один з одним здатні тільки горіти).

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

Згідно з класифікацією робочих зон відповідно до ДНАОП 0.00-1.32-01 робочих зон науково-дослідницької лабораторії, які відноситься до зон класу П-IIа - пожежонебезпечне, що містять тверді горючі речовини, нездатні переходити у зважений стан.

Джерелами загоряння можуть бути електричні іскри, коротке замикання, перевантаження електропроводки, несправність апаратури, паління в приміщенні. Тому для запобігання пожежі в приміщенні проводяться пожежно-профілактичні заходи: застосування запобіжників в електричних мережах, використання пилонепроникних сполучних і розподільних коробок, а також проводиться інструктаж з техніки пожежної безпеки.

Відповідно до ДСТУ 3675-98, ГОСТ 12.4.009-75 та ISO 3941-77 у науково-дослідницькій лабораторії знаходяться два вогнегасника: вуглекислотний типу «ОУ-5» і порошковий «ОП-2». «ОУ-5» розташований на висоті 1,5 м від підлоги поруч із вихідними дверима. У коридорі знаходяться коробки, у яких знаходиться пожежний кран і рукав, а також знаходиться вогнегасник типу «ОХП-2». В обох кінцях коридору знаходяться телефонні апарати, над якими знаходяться таблички з номерами телефонів для виклику внутрішньої, а також, якщо потрібно, міської пожежної охорони.

У науково-дослідницькій лабораторії є план евакуації у випадку виникнення пожежі. Максимальна віддаленість робочих місць від евакуаційних виходів і ширина евакуаційних проходів відповідають вимогам СНиП 2.02.02-85 та СНиП 2.01.02-85 та ДБН В 1.1-7-2002. У робочому приміщенні виконані всі вимоги НАПБ А.01.001-2004 «Правил пожежної безпеки України».

Таким чином, у науково-дослідницькій лабораторії забезпечуються технічні та організаційні рішення з пожежної безпеки.

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

У даному розділі проведено техніко-економічне обґрунтування використання радіометричного методу. Визначено потенційний ринок та конкурентоспроможність устаткування, що використовує даний метод.

5.1 Опис ідеї проекту

В межах цього підрозділу проаналізовано зміст ідеї, можливі напрямки застосування, основі вигоди які може отримати користувач товару та відмінності від існуючих аналогів та замінників.

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Засіб і метод, за допомогою якого, можна оцінювати рівень завад в мережах мм-діапазону.	Оцінка рівня завад на приймальних антенах систем мм-діапазону	Можливість дослідження рівня завад одразу в всьому робочому діапазоні частот. Немає необхідності у використанні дорогих аналізаторів спектру.
	Проектування систем мм-діапазону.	Здешевлення вартості етапу проектування мережі мм-діапазону за рахунок того, що немає необхідності у використанні дорогої вимірювальної апаратури.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

Конкурентами являються виробники існуючих засобів вимірювальної апаратури для дослідження спектру сигналів мм-діапазону.

Таблиця 5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Товари конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент			
1	Витратні матеріали				✓	
2	Розміри				✓	
3	Швидкодія					✓
4	Трудомісткість виготовлення				✓	
5	Калібрування				✓	

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводиться аудит технології, за допомогою якої можлива обробка отриманих даних з радіометричної системи.

Для обробки даних потрібно обрати пакет програмного забезпечення:

1. Google Sheets — застосунок для роботи з електронними таблицями, створена компанією Google.
2. Matlab 2018b — пакет прикладних програм для числового аналізу
3. Програмне забезпечення розроблене самостійно.

Таблиця 5.3 Технологічна здійсненність проекту

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1		Google Sheets	Так	Так
2		Matlab 2018b	Так	Так
3		Програмне забезпечення розроблене самостійно.	Ні	Ні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Matlab 2018b				

Обрано використання програмного забезпечення Matlab 2018b, оскільки в даному додатку наявний пакет під назвою 5G Toolbox, що дозволяє модулювати сигнали необхідного діапазону, що відповідають стандартам та досліджувати радіоканалу передачі даних.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В межах даного підрозділу проводиться визначення ринкових можливостей, які можна використати під час впровадження проекту, та загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту. Визначення таких можливостей дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Таблиця 5.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Невідомо
2	Загальний обсяг продаж, ум. од.	Невідомий
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Невідома
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

6	Середня норма рентабельності в галузі, %	Невідома

За результатами аналізу важко зробити висновок щодо привабливості для входження за попереднім оцінюванням.

Визначимо потенційні групи клієнтів.

Таблиця 5.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Дослідження енергетичного спектру та завад сигналів, що відповідають стандартам 5G	Оператори мобільного зв'язку що планують впровадження передачі даних за технологіями 5G	Невідомі	Спрощення та здешевлення процесу дослідження завад у сигналах мм-діапазону

Проведемо аналіз ринкового середовища: складемо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають.

Таблиця 5.6 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

1	Не готовність компаній провайдерів мобільного зв'язку використовувати не загальноприйняті методи дослідження рівня завад в каналі радіозв'язку.	Компанії оператори мобільного зв'язку не готові використовувати не традиційні методи для проектування мобільних систем передачі даних.	Конкуренція

Таблиця 5.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Нові функціональні можливості у проекті що розробляється	Додавання нових методів та можливостей у проект, що розроблюється	Розробка засобів що реалізують запропоновані функціональні можливості методу

Проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 5.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції - монополістична	Декілька підприємств, що мають світове ім'я	Значний
За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний	Підприємства розташовані у різних країнах	Значний
За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Конкуренція відбувається в рамках однієї галузі	Значний
Конкуренція за видами		

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

товарів – невідомо		
За характером конкурентних переваг – цінова		Значний
За інтенсивністю – невідомо		

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції у галузі.

Таблиця 5.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Підприємства, що виробляють аналізатори спектру та іншу вимірювальну апаратуру	Інститути, що проводять розробки на цю тематику	Невідомо	Провайдери мобільного зв’язку	Невідомо
Висновки	Можлива конкуренція на ринку	Існує можливість виходу на ринок	Невідомо	Клієнти не диктують умови на ринку	Невідомо

За результатами аналізу можна зробити висновок, що виходити на ринок можна, але можлива конкуренція з боку конкурентів. Продукт має зацікавити потенційних клієнтів за рахунок значно меншої вартості досліджень систем зв’язку.

Перелічимо фактори конкурентоспроможності

Таблиця 5.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Витратні матеріали	Система багаторазового використання
2	Розміри	Система порівнянна в розмірах з аналогами

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

3	Швидкодія	Отримання інформації про завади відбувається безпосередньо під час проведення вимірювань
4	Трудомісткість виготовлення	Апаратура складна у виготовленні
5	Градуювання	Потрібно проводити періодичне градуювання апаратури

Таблиця 5.12 SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Витратні матеріали Розміри Швидкодія	Слабкі сторони: Невідомий виробник Відсутність стартового капіталу
Можливості: Розширення функціональних можливостей Нові методи	Загрози: Апарати-замінники

З огляду на SWOT-аналіз можна прийти до висновку що нема потреби розробляти альтернативи ринкового впровадження цього проекту.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку, а саме опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Провайдери мобі-	Готові	Високий	У сегменті є	Важко

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

	льного зв'язку що планують впровадження передачі даних за технологіями 5G			конкуренція	
Які цільові групи обрано: Провайдери мобільного зв'язку що планують впровадження передачі даних за технологіями 5G					

Для роботи в обраних сегментах ринку сформулюємо базову стратегію розвитку.

Таблиця 5.15 Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія ринку
1	Диференційований маркетинг	Ціна, швидкодія	Стратегія спеціалізації

Виберемо конкурентну поведінку

Таблиця 5.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопроходьцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкуренту?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Так	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Сформуємо маркетингову концепцію товару, який отримає споживач.

Таблиця 5.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Зінченко, О.В. РІ-71мп, 2018

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Оцінка рівня завад в сигналах для визначення рівня завад у каналі зв’язку міліметрового діапазону.	Швидкість оцінки завад у каналі зв’язку мм-діапазону та значне здешевлення його дослідження	Ціна, швидкодія

Таблиця 5.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
1. Товар за задумом	Оцінка рівня завад в сигналах для визначення рівня завад у каналі зв’язку міліметрового діапазону.
2. Товар у реальному виконанні	Властивості: 1. Витратні матеріали 2. Розміри 3. Швидкодія 4. Трудомісткість виготовлення 5. Градуювання
	Якість: проведення експериментальних досліджень
	Пакування: відсутнє
	Марка: відсутня
3. Товар із підкріпленням	До продажу: невідомо
	Після продажу: невідомо

Захист буде організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності).

Визначимо цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на товар.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

Таблиця 5.20 Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
1	50 – 300 тис. USD	Невідомий	Високий	10 – 50 тис. USD.

Визначимо оптимальну систему збуту

Таблиця 5.21 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Невідома	Зберігання, встановлення контактування, інформування	Невідома	Зовнішня служба збуту та дистрибуція

Розробимо концепцію маркетингових комунікацій

Таблиця 5.22 Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Невідома	Інтернет, інші джерела інформації	Можливості приладу	Донести про функціонал та можливості приладу	Донесення про можливості та сильні сторони розро-

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

					бки

За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що в майбутньому є можливість ринкової комерціалізації проекту, оскільки попит знаходиться в фазі активного формування. Оскільки стандарти 5G на сьогоднішній день, ще не впроваджені, то важливо мати готовий продукт до стадії, коли компанії провайдери мобільного зв'язку почнуть модернізувати існуючу інфраструктуру до відповідності з новим стандартом.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

ВИСНОВКИ

1. За результатами проведеного аналітичного огляду була визначена можливість застосування радіометричного методу для визначення рівня завад в каналі зв'язку міліметрового діапазону. Доведено, що найбільш доцільним є використання радіометричних систем модуляційного типу.

2. Згідно результатам аналізу спектральних характеристик сигналів та завад у каналі зв'язку міліметрового діапазону визначено, що найбільший вплив на його характеристики, зокрема пропускну здатність, чинять внутрішньосистемна та зовнішня групова завада. Показано, що їх спектр схожий на спектр шумового сигналу.

3. Запропоновано для визначення рівня завад такого типу використовувати радіометричний метод із застосуванням існуючих апаратних засобів. Обґрунтована технічна реалізація методу та розроблена структурна схема вимірювальної системи. Згідно результатам комп'ютерного моделювання, проведеного для уточнення характеристик такої системи, встановлено, що рівень потужності завад та сигналів, що має вимірювати радіометрична система, знаходиться у межах від 10^{-13} до 10^{-6} Вт, причому смуга робочих частот може змінюватись від 0,1 ГГц до 2 ГГц.

4. Згідно результатам експериментальної перевірки розробленого методу, показано, що застосування існуючих радіометричних систем дозволяє визначити рівень завад у каналі зв'язку міліметрового діапазону з точністю 5-10% в залежності від їх потужності.

5. У результаті використання розробленого методу для вимірювання спектральних характеристик інформаційних сигналів показано, що відомі радіометричні системи дозволяють вимірювати частоту сигналів з абсолютною похибкою 0,20-0,25 ГГц. Для зменшення даної величини запропоновано ввести у тракт проміжної частоти електрично керований смуговий фільтр.

Зінченко. О. В. РІ-71мп, 2018

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Forecast and Methodology [Електронний ресурс] / Cisco Visual Networking Index. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/abdul-kafi1/docs/white_paper_c11-481360.pdf.

2. Y.S. Rao, W. Yeung, A. Kripalani (2000), "Third-generation (3G) radio access standards", WCC 2000 - ICCT 2000. 2000 International Conference on Communication Technology Proceedings, August 21-25, 2000, Beijing.

3. E. Perahia et al. IEEE 802.11ad: Defining the Next Generation Multi-Gb/s Wi-Fi. – 2010 7th IEEE Consumer Commun. and Net. Conf., 9–12 Jan., 2010, p.1–5.

4. Жоую П. Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона / П. Жоую, Х. Фарук. // ТЕХНОЛОГИИ. – 2011. – №5. – С. 11–12.

5. Колыбельников А. И. Обзор технологий беспроводных сетей / А. И. Колыбельников // Труды МФТИ. — 2012 — Т. 4. — № 2. — С. 3-29.

6. Сукачев Э. А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами: учеб. пособ. / Э.А. Сукачев – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2013. – 256 с.

7. Варгузин В. А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи: учеб. пособие / В. А.Варгузин, И. А. Цикин. — СПб.: БХВ-Петербург, 2013. — 352 с.

8. Банкет В. Л. Методы передачи информации в системах беспроводного доступа к телекоммуникационным сетям нового поколения / В. Л. Банкет — Одесса: ОНАС, 2013. — 178 с.

9. Столлингс В. Криптография и защита сетей: принципы и практика. 2-е издание / Вильям Столлингс. — М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. — 672 с.

10. Scott, Allan W. RF measurements for cellular phones and wireless data systems / Allan W. Scott, Rex Frobenius. — Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. — 525 p.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

11. Carvalho, Nuno Borges. Microwave and wireless measurement techniques /Nuno Borges Carvalho and Dominique Schreurs. — Cambridge University Press, 2013. — 287 p.

12. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. 4-е изд. / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — СПб: Питер, 2015. — 944 с.

13. Анализаторы спектра и сигналов [Електронний ресурс] / Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG 2000-2018. — Rohde & Schwarz, 2018. — Режим доступу: https://www.rohde-schwarz.com/ru/products/test-and-measurement/signal-spectrum-analyzers/pg_overview_63665.html

14. Spectrum Analyzers (Signal Analyzers) [Електронний ресурс] / Keysight Technologies. — Keysight Technologies, 2018. — Режим доступу: https://www.keysight.com/en/pcx-x2015002/spectrum-analyzers-signal-analyzers?cc=US&lc=eng.

15. Тестирование устройств беспроводной связи [Електронний ресурс] / National Instruments Corp. — National Instruments Corporation, 2018 — Режим доступу: http://www.ni.com/ru-ru/innovations/wireless/wireless-device-test.html.

16. Векторный анализатор сигнала PXI [Електронний ресурс] / National Instruments Corp. — National Instruments Corporation, 2018. — Режим доступу: http://www.ni.com/ru-ru/support/model.pxie-5668.html.

17. Pietikainen K. IEEE 802.11g tolerance to narrowband jamming / Kari Pietikainen, Aki Silvennoinen, Michael Hall, Sven-Gustav Häggman // MILCOM 2005 – IEEE Military Communications Conference. — 2005. — Vol. 24. — No. 1, October. — pp.3002-3004.

18. Пат. 2344546, Российская Федерация, МПК H 04 B 7/02. Адаптация скорости передачи данных в OFDM-системе при наличии помех [Текст] / Гончаров В. Е.; заявитель и патентообладатель Корпорация «Самсунг электроникс Ко., Лтд.». — № 2000131736/09; заявл. 18.04.07; опубл. 20.01.09, Бюл. № 23 – 3 с.

19. Пат. України № 90655 МПК H 04 J 11/00. Оцінка шуму і взаємних перешкод у системі OFDM / Сутівонг Арак, Наджиб Айман Фав-Зі, Агравал Авніш; заявник і

Зінченко О. В. РІ-71мп. 2018

патентовласник Корпорация «Квелкомм Інкорпорейтед» — № 200511841; заявл. 14.05.04; опубл. 25.05.10, Бюл. № 10 — 15 с.

20. Пат. України № 88328 МПК H 04 L 27/26, H 04 B 1/10. Оцінка дисперсії шуму в безпровідному зв'язку для об'єднання рознесення і масштабування відповідно до логарифмічної правдоподібності / Намгоонг Дзуне, Сюй Хао, Блек Пітер Дж., Джаяраман Срікант; заявник і патентовласник Корпорация «Квелкомм Інкорпорейтед» — № 200704233; заявл. 16.09.05; опубл. 12.10.09, Бюл. № 19 — 16 с.

21. Назаров Л. Е. Оценка мощности интермодуляционных помех при предельном ограничении огибающей сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием [Електронний ресурс] / Л. Е. Назаров, А. С. Зудилин // Журнал радиоэлектроники. — 2013. — № 6. — Режим доступу: http://jre.cplire.ru/jre/jun13/1/text.pdf.

22. Пат. України №85830 МПК H 04 B 7/08, H 04 B 7/06. Оцінка каналу та просторова обробка для TDD MIMO систем / Кетчум Джон У., Уоллейс Марк, Уолтон Дж. Родні, Говард Стівен Дж.; заявник і патентовласник Корпорация «Квелкомм Інкорпорейтед» — № 200504942; заявл. 24.10.03; опубл. 10.03.09, Бюл. № 5 — 18 с.

23. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы : в 2 т. / Е. А. Шарков. Т. 1.— М. : ИКИ РАН, 2014. — 544 с.

24. Skou N. Microwave radiometer systems: design and analysis / Niels Skou, David Le Vine. — [2nd ed.]. — Boston-London: Artech House, 2006. — 227 p.

25. Скрипник Ю. О. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону: навч. посіб. / Ю. О. Скрипник, В. П. Манойлов, О. П. Яненко; за ред. В. П. Манойлова. — Житомир : ЖІТІ, 2001. — 374 с.

26. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / [Скрипник Ю. А., Яненко А. Ф., Манойлов В. Ф. и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Скрипника. — Житомир : Волынь, 2003. — 408 с.

27. Есепкина, Н.А. Радиотелескопы и радиометры / Н.А. Есепкина, Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский.— М.: Наука, 1973. — 416с.

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

28. Матричные радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации летательных аппаратов / [В. И. Антюфеев, В. Н. Быков, А. М. Гричанюк и др.]. – Х. : Изд-во ООО «Щедрая усадьба плюс», 2014. — 372 с.

29. Михайлов В.Ф. Микроволновая спутниковая аппаратура дистанционного зондирования Земли: Учеб. Пособие / Михайлов В. Ф., Брагин И. В., Брагин С. И. — СПбГУАП. СПб., 2003. — 404 с.

30. Тимановский А. Л., Пирогов Ю. А. Сверхразрешение в системах пассивно-го радиовидения. Монография — М.: Радиотехника, 2017. — 160 с

31. Левин М. Л., Рытов С. М. Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике. – М.: Наука. – 1967. – 308 с.

32. Алмазов-Долженко К. И. Коэффициент шума и его использование на СВЧ / К. И. Алмазов-Долженко. — М. : Научный мир, 2000. — 240 с.

33. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a focus on Propagation Models / T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney et al. // IEEE Trans. on AP. — 2017. — Vol 65. — Issue 12. — P. 6213-6230.

34. Основы теории мобильной и беспроводной связи [Електронний ресурс] / siblec.ru, 2018. — Режим доступу: http://siblec.ru/index.php?dn =html&way= bW9kL2h0bWwvY29udGVudC84c2VtLzA3NS8yLTQtNC5odG0

35. Вишневский В. Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне:новые горизонты скоростей / В. Вишневский, С. Фролов, И. Шахнович // Электроника: НТБ. — 2011. — № 1. — С. 90-97.

36. Вишневский В. Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Стандарт IEEE 802.15.3c и спецификация WirelessHD / В. Вишневский, С. Фролов, И. Шахнович // Электроника: НТБ. — 2010. — No 3. — С.70–79.

37. Колыбельников А. И. Обзор технологий беспроводных сетей / А. И. Колыбельников // Труды МФТИ. — 2012. — Том 4, № 2. — С. 3–29.

38. Ермолаев В.Т. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи: Монография / В. Т. Ермолаев, А. Г. Флаксман. — Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. – 368 с.

Зіненко, О. В. РІ-71мп. 2018

39. Маглицкий Б.Н. Основы технологии OFDM: Учебное пособие / Б. Н. Маглицкий — СГУ телекоммуникаций и информатики, Новосибирск: 2016. – 116 с.

40. Скрынников В.Г. Повышение скорости передачи данных в сетях 11MT8/H8PA+ на основе минимизации внутрисистемных помех / В.Г. Скрынников // Электросвязь. — 2013. — № 7. — С. 37–40.

41. Скрынников В.Г. Предварительная оценка параметров сети UMTS/HSDPA / В.Г. Скрынников // T-Comm. — 2008. — № 3. — С. 34–37.

42. Оценка уровня групповой помехи от сети 3G на РЭС правительственного назначения по результатам измерений мощности сигналов передатчиков базовых станций UMTS / [Жуков А. О., Сорокин С. А., Коченко С. Н. и др.] // T-Comm. — 2014. — № 10. — С. 27–29.

43. Регламент радиосвязи. Том 1 Статьи / Международный союз электросвязи. — Женева : ITU, 2008. — 416 с.

43. Системы мобильной связи: Учеб. пособ. / [Ипатов В. П., Орлов В. И., Самойлов И. М. и др.]. — М.: Горячая линия-Телеком, 2003. — 272 с.

44. Зінченко О. В. Радіометричний метод оцінки харак-теристик каналу зв'язку міліметрового діапазону / Зінченко О. В., Перегудов С. М. // Тези доповідей I Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп’ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (19–20 жовтня 2018 р.). – Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2018. – С. 181-182.

45. Proakis John G. Contemporary Communication Systems Using MATLAB : Third Edition / John G. Proakis, Masoud Salehi, Gerhard Bauch. — Stamford: Cengage Learning, 2014. — 594 p.

46. 5G Toolbox (Documentation). [Електронний ресурс] / MathWorks, Inc. — MathWorks, Inc., 2018.— Режим доступу: https://www.mathworks.com/help/5g/.

Зінченко, О. В. РІ-71мп. 2018

ДОДАТОК А ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

ПОГОДЖЕНО

керівник магістерської дисертації

к.т.н., доц. Перегудов С. М.

_____ _____

(підпис) (дата)

ЗАТВЕРДЖЕНО

завідувач кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

д.т.н., проф. Нелін Є. А.

_____ _____

(підпис) (дата)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ

“РАДІОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ЗАВАД В КАНАЛІ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ”

Київ 2018

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

1 Підстава для виконання роботи

Підставою для виконання роботи є завдання на магістерську дисертацію.

2 Мета і призначення

Мета роботи: дослідження можливості застосування радіометричного методу для визначення рівня завад у каналі зв’язку міліметрового діапазону.

Об’єкт дослідження: радіоканал зв'язку мм-діапазону довжин хвиль.

Предмет дослідження: рівень завад в радіоканалі зв'язку мм-діапазону.

3 Вихідні дані для проведення роботи

Основні джерела:

1. Rappaport T. S. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks-with a focus on propagation models / Rappaport T. S., Y. Xing, G. R. MacCartney et al. // IEEE Trans. on AP. – 2017. – Vol 65. – Issue 12. – pp. 6213-6230.

2. Жуков А. О. Оценка уровня групповой помехи от сети 3G на РЭС правительственного назначения по результатам измерений мощности сигналов передатчиков базовых станций UMTS / Жуков А. О, Сорокин С. А., Коченко С. Н., Кабешов А. В. // T-Comm. – 2014. – № 10. – С. 27-29.

3. Skou N. Microwave Radiometer Systems: Design and Analysis / N. Skou, D. Le Vine. – [2nd ed.]. – Boston-London: Artech House, 2006. – 227 p.

4. Proakis J. G. Contemporary Communication Systems Using MATLAB : Third Edition / J. G. Proakis, M. Salehi, G. Bauch. – Stamford: Cengage Learning, 2014. – 594 p.

4 Вимоги до виконання

1. Виконати аналітичний огляд інформаційних джерел за темою дисертації.

2. Вибрати модель поширення сигналів у радіоканалі зв’язку мм-діапазону.

3. Провести аналіз процесів створення завад різних типів у радіоканалі (групової, інтерференційні спотворення, міжсимвольна інтерференція та ін.), оцінити їх вплив на пропускну здатність радіоканалу мм-діапазону та визначити основні типи завад.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

4. Обґрунтувати та розробити радіометричний метод визначення рівня завад у каналі зв’язку мм-діапазону.

5. Провести комп’ютерне моделювання розподілу потужності у частотному спектрі завад в середовищі MatLab (версій 2017 або 2018 з пакетами розширення WLAN та 5G).

5 Етапи та термін виконання

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації
1	Підбір джерел за темою дисертації	10.2017
2	Аналітичний огляд інформаційних джерел за темою дисертації	12.2017
3	Розробка ТЗ	06.2018
4	Вибір моделі поширення сигналів у каналі зв’язку мм-діапазону та аналіз принципів утворення основних типів завад	09.2018
5	Розробка радіометричного методу визначення рівня завад у радіоканалі мм-діапазону та його обґрунтування	10.2018
6	Комп’ютерне моделювання енергетичного спектра завад у каналі зв’язку в середовищі MatLab	11.2018
7	Оформлення магістерської дисертації	12.2018
8	Підготовка до захисту та отримання допуску до захисту та подача роботи в ЕК	12.2018

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

6 Очікувані результати та порядок реалізації

6.1 Модель поширення сигналів у радіоканалі зв’язку мм-діапазону.

6.2 Радіометричний метод визначення рівня завад у каналі зв’язку мм-діапазону.

6.3 Величина похибки вимірювання середньої потужності завад у радіоканалі мм-діапазону із застосуванням розробленого методу.

6.4 Висновки за результатами виконаної роботи.

7 Матеріали які подаються після закінчення дисертації

7.1 Завдання на магістерську дисертацію.

7.2 Технічне завдання.

7.3 Пояснювальна записка.

7.4 Презентація.

8 Порядок приймання дисертації та її етапів

8.1 Поетапне узгодження з керівником.

8.2 Представлення кафедрі.

8.3 Попередній захист магістерської дисертації.

8.4 Захист дисертації перед екзаменаційною комісією.

9 Вимоги до розроблення документації

1. ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання.
2. ДСТУ 3973-2000. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання науково-дослідних робіт Загальні положення.

10 Орієнтовний зміст дисертації

1. Аналітичний огляд інформаційних джерел за темою дисертації.
2. Модель поширення сигналів у каналі зв’язку мм-діапазону та аналіз процесів створення завад.
3. Радіометричний метод визначення рівня завад у каналі зв’язку мм-діапазону та його обґрунтування.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

4. Розподіл потужності у частотному спектрі завад основних типів, визначений в результаті комп’ютерного моделювання та величина похибки вимірювання середньої потужності завад радіометричним методом.

Виконавець _____

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

ДОДАТОК Б ПУБЛІКАЦІЇ

УДК 621.396

Зінченко Олександр Васильович, магістрант
Перегудов Сергій Миколайович, к.т.н., доц.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

РАДІОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Останніми роками спостерігається стрімкий розвиток систем стільникового зв’язку з використанням останніх досягнень в галузі мікроелектроніки. Його характерною рисою є підвищення швидкості передачі великих потоків даних, внаслідок чого виникає перевантаженість традиційних радіоканалів зв’язку у дециметровому діапазоні хвиль. Як відомо, характеристики радіоканалу залежать від багатьох зовнішніх факторів та параметрів апаратури зв’язку, зокрема: загасання сигналу, відбиття від перешкод, у тому числі багаторазового, зміни спектрального складу сигналу внаслідок ефекту Доплера, наявності сторонніх радіозавад тощо. Усе це спричиняє підвищення потужності шуму в каналі відносно потужності корисного сигналу . Швидкість передачі даних (в біт/с) через канал залежить від його частотної смути , та визначається за формулою Шеннона

$$C = \Delta f \log_2 \left(1 + P_S / P_N\right).$$

Тому можна добитися зростання через розширення смуги , що простіше реалізувати у більш високочастотних діапазонах. Тому певними міжнародними організаціями, що займаються розподілом частотного ресурсу, за результатами проведених попередніх досліджень запропоновано розробляти майбутні системи бездротового зв’язку у міліметровому діапазоні довжин хвиль. У теперішній час готується низка нормативних документів з вимогами до таких систем. Зокрема вже прийнято стандарт IEEE 802.11ad щодо організації радіомереж у діапазоні 60 ГГц.

Зінченко О. В. РІ-71мп, 2018

Проте через значне зростання кількості абонентів, а також впровадження багатопроменевої технології MIMO у мережах стільникового зв'язку, особливо з кодовим розділенням каналів, виникає загроза збільшення так званої групової завади. Ця завада створюється внаслідок багатоканального характеру роботи базових станцій (БС) сусідніх стільників та стільника абонента, коли на його приймач поступають сигнали, які призначені для інших абонентів мережі. За опублікованими результатами досліджень рівень такої завади в залежності від активності абонентів лежить у межах (65 … 45) дБмВт і залежить від структури радіомережі. У загальному випадку потужність групової завади описується формулою

$$P_G = P'_{\Sigma j} / L\left(d'_j\right) + \alpha_j P^*_{\Sigma j} / L\left(d_j\right),$$

де $P'_{\Sigma j}$ — сумарна потужність БС ближніх стільників на вході приймача j-го абонента; $L\left(d'_j\right)$ — загасання їх сигналів, що визначається для усередненої відстані d'_j від них до j-го абонента; $P^*_{\Sigma j}$ — потужність всіх інших сигналів БС стільника j-го абонента; α_j — коефіцієнт, який характеризує багатопроменевий характер роботи БС (він змінюється від 0 до 1 в залежності від умов роботи і структури мереж).

Оскільки складові групової завади мають досить широкий спектр, її можна вважати шумоподібним сигналом. Величина є важливою характеристикою каналу зв'язку, а її вимірювання традиційними методами потребує спеціальної апаратури та значних часових і обчислювальних ресурсів. Зокрема, такі вимірювання можна проводити кореляційним методом, використовуючи векторний генератор як джерела псевдовипадкових сигналів і аналізатор спектру як приймач. Причому необхідно забезпечити синхронізацію їх роботи.

Наукова новизна представленої роботи полягає у розробці радіометричного методу оцінки та контролю характеристик каналу зв'язку мм-діапазону. До його переваг слід віднести можливість компенсації власних шумів вимірювальної системи, що збільшує її чутливість на 1-2 порядки, спрощення схеми вимірювань та зменшення часу їх проведення.

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

ДОДАТОК В ПРОГРАМНИЙ КОД MATLAB

```
burst.BlockPattern = 'Case B';
burst.SSBPeriodicity = 20;
burst.NFrame = 4;
burst.SSBTransmitted = [1 1 1 1 1 1 1 1];
burst.NCellID = 102;
gnb.SubcarrierSpacing = 15;
gnb.NDLRB = 52;
gnb.CyclicPrefix = 'Normal';
carrierInfo = hOFDMInfo(gnb);
burst.SampleRate = carrierInfo.SamplingRate;
K = carrierInfo.NSubcarriers;
burst.FrequencyPointA = -K/2 * gnb.SubcarrierSpacing * 1e3;
burst.DL_DMRS_typeA_pos = 2;
burst.PDCCHConfigSIB1 = 17;
burst.CellBarred = 0;
burst.IntraFreqReselection = 0;
burst.SubcarrierSpacingCommon = carrierInfo.SubcarrierSpacing;
burst.DisplayBurst = true;
ntxants = 8;
nrxants = 2;
velocity = 30.0;
fc = 4e9;
c = physconst('lightspeed');
fd = (velocity*1000/3600)/c*fc;
channel = nrTDLChannel;
channel.Seed = 24;
channel.DelayProfile = 'TDL-C';
channel.DelaySpread = 300e-9;
channel.MaximumDopplerShift = fd;
channel.MIMOCorrelation = 'Medium';
channel.Polarization = 'Cross-Polar';
channel.NumTransmitAntennas = ntxants;
```

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018

```
channel.NumReceiveAntennas = nrxants;
SNRdB = 50;
disp(burst);
burstInfo = hSSBurstInfo(burst);
disp(burstInfo);
[~,burstGrid] = hSSBurst(burst);
W = fft(eye(ntxants)) / sqrt(ntxants);
beamformedGrid = zeros([size(burstGrid) ntxants]);
blockSubcarriers = burstInfo.OccupiedSubcarriers;
for ssb = 1:length(burstInfo.SSBIndex)
   blockSymbols = burstInfo.OccupiedSymbols(ssb,:);
   block = burstGrid(blockSubcarriers,blockSymbols);
   Wssb = W(mod(ssb-1,ntxants)+1,:);
   beamformedBlock = reshape(block(:) * Wssb,[size(block) ntxants]);
   beamformedGrid(blockSubcarriers,blockSymbols,:) = beamformedBlock;
end
beamformedGrid = beamformedGrid(:,1:max(burstInfo.OccupiedSymbols(:))+1,:);
ofdmConfig.SubcarrierSpacing = burstInfo.SubcarrierSpacing;
ofdmConfig.NDLRB = burstInfo.NDLRB;
ofdmConfig.CyclicPrefix = burstInfo.CyclicPrefix;
ofdmConfig.Windowing = 0;
[burstWaveform,ofdmInfo] = hOFDMModulate(ofdmConfig,beamformedGrid);
rxWaveform = channel(burstWaveform);
rng('default');
rxWaveform = awgn(rxWaveform,SNRdB,-10*log10(double(ofdmInfo.Nfft)));
SR = 30.72e6;
tdl.SampleRate = SR;
analyzer = dsp.SpectrumAnalyzer('SampleRate',tdl.SampleRate);
analyzer(rxWaveform);
```

Зінченко, О. В. РІ-71мп, 2018