

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

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

«На правах рукопису»
УДК 621.391.8, 621.317.3

До захисту допущено:

В.о.зав.кафедри

_____ Євгеній НЕЛІН

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні технології
мікросистемної радіоелектронної техніки»

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Приймальна система для проведення радіомоніторингу каналу
зв'язку міліметрового діапазону»

Виконав (-ла):

студент (-ка) 2 курсу, групи РІ-391мп

Фесюк Антон Андрійович _____

Керівник:

к.т.н., доцент Перебудов Сергій Миколайович _____

Рецензент:

Ст.викладач Бондаренко Геннадій Іванович _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2020

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

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Євгеній НЕЛІН

«02» вересня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студента

Фесюка Антона Андрійовича

1. Тема дисертації «Приймальна система для проведення радіомоніторингу каналу зв'язку міліметрового діапазону»
науковий керівник дисертації к.т.н., доцент Перегудов С.М.
затверджені наказом по університету від «5» листопада 2020 р. №3223-с
(Для групи РІ-з91 від 5 листопада 2020 р. №3222-с)
2. Термін подання студентом дисертації 11 грудня 2020 року
3. Об'єкт дослідження: радіоканал зв'язку міліметрового діапазону довжин хвиль.
4. Предмет дослідження: характеристики приймальної системи радіометричного типу міліметрового діапазону.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Аналітичний огляд джерел інформації за темою дисертації. 2. Дослідження характеристик сигналів та завад у радіоканалі зв'язку мм-діапазону. 3. Дослідження характеристик приймача радіометричного типу та оцінка можливості його використання як засобу для

проведення радіомоніторингу. 4. Розробка методу радіомоніторингу каналу зв'язку мм-діапазону.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____

Презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій: тези доповіді на Всеукраїнській науково-технічній конференція студентів та аспірантів "Радіоелектроніка в ХХІ столітті"

9. Дата видачі завдання 02 вересня 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз вимог завдання, підбір інформаційних джерел за темою магістерської дисертації	02.09.2020-20.09.2020	Виконано
2	Розробка методу радіомоніторингу каналу зв'язку та вибір засобу для його проведення	21.09.2020 – 20.10.2020	Виконано
3	Проведення експериментальних досліджень щодо перевірки розробленого методу та уточнення вимог до параметрів приймальної системи	21.10.2020 – 10.11.2020	Виконано
4	Оформлення магістерської дисертації	10.11.2020 – 10.12.2020	Виконано
5	Підготовка до захисту дисертації	10.12.2020 – 20.12.2020	Виконано

Студент

Фесюк Антон Андрійович

Науковий керівник

Перебудов Сергій Миколайович

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 96с., 36 рис., 28 табл., 1 додаток, 30 джерел

Актуальність теми зумовлена активною розробкою методів та засобів передачі даних через радіоканал міліметрового діапазону та необхідністю забезпечення захисту інформації, що передається.

Метою роботи є дослідження можливості застосування радіометричної приймальної системи для проведення радіомоніторингу, суть якого полягає у реєстрації сигналів закладних пристроїв та оцінки пропускної здатності каналу зв'язку міліметрового діапазону.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються такі завдання: проведення аналітичного огляду джерел інформації за темою дисертації; оцінка можливості застосування радіометричного методу для визначення основних параметрів сигналів та завад у радіоканалі сучасних систем бездротового зв'язку; розробка та обґрунтування методу радіомоніторингу із застосуванням приймальної системи радіометричного типу; проведення експериментальної перевірки розробленого методу та оцінка доцільності його використання.

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

Предмет дослідження: характеристики приймальної системи радіометричного типу міліметрового діапазону.

Методами дослідження є методи математичного аналізу і математичної статистики — для вибору математичної моделі радіоканалу та обробки результатів вимірювань; експериментальні методи дослідження метрологічних характеристик днючого радіометра міліметрового діапазону.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у застосуванні радіометричних методів і засобів для визначення параметрів сигналів і завад у каналі зв'язку мм-діапазону та оцінки пропускної здатності каналу зв'язку.

Практичне значення результатів роботи полягає у можливості використання радіометричних систем для радіомоніторингу каналу зв'язку мм-діапазону, що робить процедуру його проведення більш простою у порівнянні з відомими.

Ключові слова: радіометричний метод, канал зв'язку, радіомоніторинг.

ABSTRACT

The urgency of the topic is due to the high demand for such equipment and the low level of proposals from manufacturers for budget equipment.

The purpose of this work is to study the possibility of determining the parameters of the radiometric system for radio monitoring, corresponding to the complete analysis and restoration of signals in the rear extensions and the assessment of the capacity of medical diagnostics.

To achieve this goal, the following tasks are solved: conducting an analytical review of sources of information on the topic of the dissertation; study of the possibility of using the radiometric method to determine the basic parameters of signals and interference in the radio channel of modern mobile communication systems; development and substantiation of the method of radio monitoring with the use of the receiving system of radiometric type; conducting an experimental test of the developed method and evaluating 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 to select a mathematical model of the radio channel, there are methods of mathematical analysis, and mathematical statistics - to process the measurement results; experimental research methods using an active radiometer in the band 45-52 GHz.

The scientific novelty consist in the application of radiometric methods and means for determining the parameters of signals and interference in the communication channel of the mm range and estimating the bandwidth.

The practical value of the results consist in the possibility of using radiometric receiving systems for radio monitoring of the mm-band communication channel, which is simpler than the known ones.

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

Фесюк А.А. РІ-391МП, 2020

Зміст

СКРОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	9
ВСТУП.....	10
1 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ РАДІОКАНАЛІВ ЗВ’ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ	13
1.2 Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням	17
1.3 Засоби радіомоніторингу та захисту каналів зв’язку	21
1.3.1 Широкосмуговий детектор електромагнітного поля	21
1.3.2 Програмно-апаратні комплекси	22
1.3.3 Аналізатори спектру	24
1.3.4 Засоби передачі та виводу результатів вимірювань.....	27
1.4 Радіометричні методи вимірювання широкосмугових сигналів.....	28
2 РАДІОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД МОНІТОРИНГУ КАНАЛУ РАДІОЗВ’ЯЗКУ ТА ЙОГО ОБГРУНТУВАННЯ.....	34
2.1 Принцип роботи приймальної радіометричної системи моніторингу каналу зв’язку	35
2.2 Обґрунтування вибору структурної схеми приймальної системи для радіомоніторингу.....	36
2.3 Аналіз методів передачі даних через радіоканал зв’язку міліметрового діапазону	42
2.4 Оцінка рівню сигналу закладного пристрою.....	51
2.4 Основні принципи та технічна реалізація розробленого методу	56
2.5 Вдосконалення низько частотного тракту РС	59
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЙМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РАДІОМОНІТОРИНГУ	63
4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	75

4.1	Опис ідеї проекту.....	75
4.2	Технологічний аудит ідеї проекту	76
4.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	77
4.4	Розроблення ринкової стратегії проекту.....	81
4.5	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	82
	ВИСНОВКИ.....	86
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	87
	ДОДАТОК Публікація за темою дисертації.....	91

Фесюк А.А. РІ-391 МП, 2020

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БС — базова станція мобільного зв'язку

ГЕШ — генератор еталонного шуму

ЕМВ — електромагнітне випромінювання

ЗІ — захист інформації

МТ — мобільний термінал

НСД — несанкціонований доступ

НШС — надшироко смуговий сигнал

НВЧ — надвисокочастотний

ПК — персональний комп'ютер

РЗП — радіозакладний пристрій

РС — радіометрична система

СД — синхронний детектор

СЦП — спектральна щільність потужності

СЦПШ — спектральна щільність потужності шуму

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

WLAN — wireless local area network (бездротова локальна мережа)

SS — Spread Spectrum (розширення спектру)

ВСТУП

Актуальність даної роботи пов'язана із застосуванням електронних пристроїв в системах зв'язку для передачі інформації через радіоканал. За допомогою таких систем оброблюються величезні об'єми інформації. Основними вимогами для них є забезпечення конфіденційності інформації та цілісності даних, що передаються. Це одні з основних задач захисту інформації (ЗІ). Не завжди така інформація призначена для широкого користування, тому виникає необхідність у захисті її конфіденційності. Щоб оцінити можливості збереження інформації в таємниці визначають можливі канали її витоку. Такими каналами можуть бути й технічні, зокрема електромагнітний. Стандартні засоби запобігання витоку інформації через цей канал передбачають участь висококваліфікованого персоналу та є суттєво затратними. Тому виникає необхідність у розробці нових методів та засобів ЗІ [1]. З врахуванням зростання швидкості передачі інформації та розширення частотних діапазонів каналів зв'язку сучасних телекомунікаційних систем одним з них може бути радіометричний метод, у якому використовуються широкосмугові приймальні системи. Наприклад, за його допомогою можна визначати певні характеристики каналів бездротового зв'язку [1].

Для оцінки можливості того або іншого методу ЗІ в бездротових мережах, зокрема у стільниковому зв'язку, слід враховувати особливості передачі даних у конкретному радіоканалі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації 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 дослідження можливості застосування радіометричної приймальної системи для проведення радіомоніторингу, суть якого полягає у реєстрації сигналів закладних пристроїв та оцінки пропускної здатності каналу зв'язку міліметрового діапазону.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються такі завдання:

- провести аналіз відомих засобів моніторингу каналів радіозв'язку, оцінити можливості їх вдосконалення і дослідити особливості апаратури зв'язку та методи оброблення радіосигналів, що використовуються;
- обґрунтувати та розробити метод радіомоніторингу, суть якого полягає у застосуванні приймальної системи радіометричного типу для визначення параметрів сигналів радіозакладних пристроїв та оцінки пропускної здатності радіоканалу зв'язку мм-діапазону;
- за результатами експериментальних досліджень характеристик приймальної радіометричної системи оцінити можливість застосування запропонованого методу для проведення моніторингу каналів зв'язку мм-діапазону.

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

Предметом дослідження є характеристики приймальної системи радіометричного типу міліметрового діапазону.

Методами дослідження є методи математичного аналізу і математичної статистики — для вибору математичної моделі радіоканалу та обробки результатів вимірювань; експериментальні методи дослідження метрологічних характеристик діючого радіометра міліметрового діапазону для визначення можливості застосування систем такого типу для проведення радіомоніторингу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у застосуванні радіометричних методів для визначення параметрів сигналів і завад у каналі зв'язку мм-діапазону та оцінки пропускної здатності каналу зв'язку.

Практичне значення одержаних результатів значення результатів роботи полягає у можливості використання радіометричних систем для радіомоніторингу каналу зв'язку мм-діапазону, що робить процедуру його проведення більш простою у порівнянні з відомими.

Особистий внесок магістранта. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В опублікованій роботі магістранту належить: розробка пристрою обертання фази сигналу в синхронному детекторі.

Публікації. За результатами проведених досліджень опубліковані тези доповіді у збірнику матеріалів II Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів «Радіоелектроніка в XXI столітті» (2019 р.), м. Київ.

Фесюк А.А. РІ-391МП, 2020

1 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ РАДІОКАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Розвиток технологій передачі даних та захист інформації телекомунікаційних системах, зокрема, в системах мобільного зв'язку та інших засобах бездротової передачі даних, вимагає застосування певних протоколів передачі даних та захисту інформації, які визначені у певних стандартах. Більш відомі стандарти, що використовуються мобільними операторами — це GSM, CDMA 1X, CDMA EV-DO, WCDMA (UMTS) та інші.

1.1 Розвиток технологій передачі даних та захист інформації в каналах зв'язку радіомереж

Історично розвиток мобільного радіозв'язку складається з етапів, що характеризуються поколіннями застосованої апаратури.

1G — перше покоління бездротових телефонних технологій і мобільних телекомунікацій. Це аналогові телекомунікаційні стандарти [3], які були введені в 80-х роках минулого століття і використовували формати AMPS в США та поєднання форматів TACS и NMT в Європі

2G — цифрові системи телефонного зв'язку, у яких застосовувався формат GSM в Європі та D-AMPS, а також рання версія CDMA — в США.

3G — цифрові системи, що працюють в дециметровому діапазоні частот (близько 2 ГГц), забезпечують швидкість передачі даних понад 2 Мбіт/с. Мережі із застосуванням таких систем надають можливість організувати відеозв'язок та передачу відеоданих у реальному часі. Відомі два стандарти 3G: UMTS (W-CDMA) та CDMA2000. UMTS більш поширений в основному в Європі, CDMA2000 — в Азії та США [3].

4G — це покоління мобільного зв'язку, стандарти якого відповідають вимогам швидкості передачі даних між абонентами, що рухаються (до 100 Мбіт/с), і нерухомих абонентів (до 1 Гбіт/с). Окрім того, основна відмінність мереж чет-

вертого покоління від третього полягає в тому, що технологія 4G повністю заснована на протоколах пакетної передачі даних і використання технології ортогонального частотного ущільнення.

5G — покоління систем мобільного зв'язку, що діють на основі стандартів телекомунікацій (5G / IMT-2020), які є подальшим розвитком стандартів 4G / IMT-Advanced. Системи п'ятого покоління працюють у частотному діапазоні до 6 ГГц, та додаткових частотних каналах у міліметрового діапазону, що забезпечує досить велику абсолютну смугу робочих частот і відповідно, швидкість передачі даних. На рисунку 1.1 зображено діаграми каналів в частотному діапазоні для систем зв'язку різних поколінь. Крім смуги робочих частот важливою характеристикою каналу зв'язку є бюджет каналу. Ця характеристика дозволяє визначити достовірність передачі даних системи зв'язку.

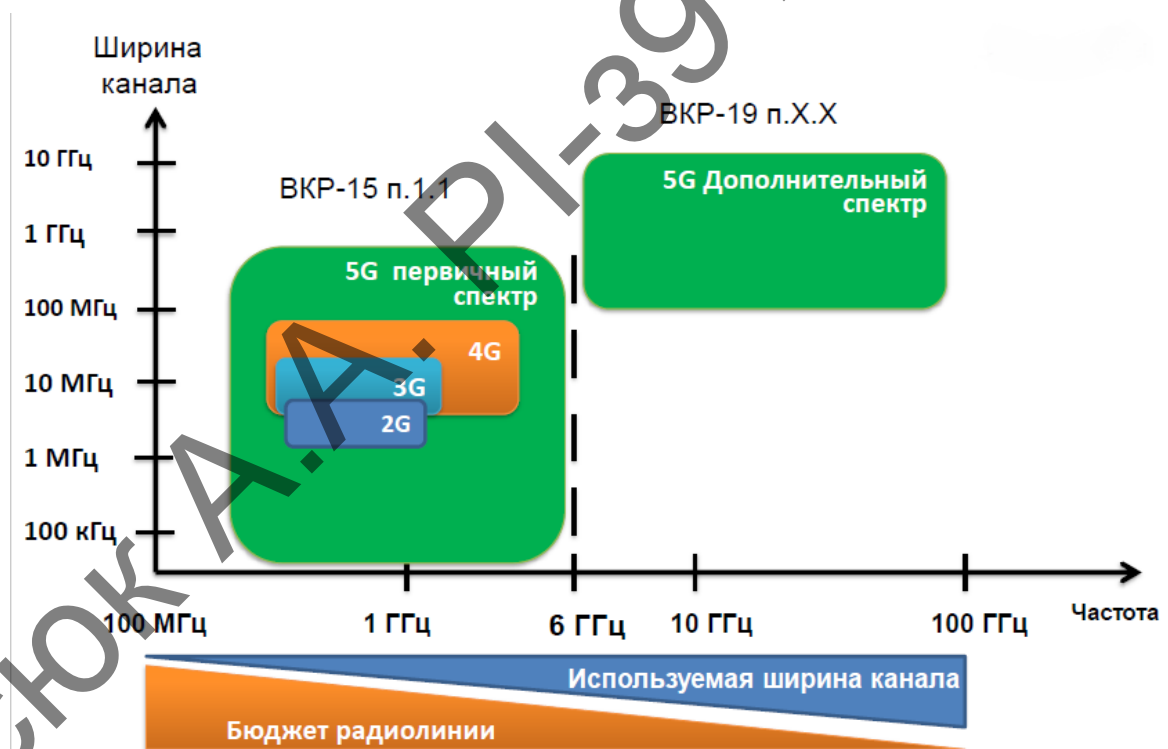


Рисунок 1.1 — Частотні канали поколінь стільникового зв'язку [5].

Через стрімке зростання швидкості передачі інформації у радіоканалі зв'язку, виникає потреба застосовувати більш високочастотні діапазони. Передбачається, що п'яте покоління мобільного зв'язку працюватиме в діапазоні частот 20 – 50 ГГц, а також розглядається можливість використання 5 мм-діапазону

(60 ГГц). Тому для здійснення радіомоніторингу, як заходу технічного захисту інформації, необхідно використовувати апаратуру також і мм-діапазону.

Враховуючи вище сказане, можна запропонувати як технічні засоби для проведення радіомоніторингу радіометричні системи (РС), або радіометри, міліметрового діапазону. Вони використовуються для вимірювання дуже слабких сигналів з шумоподібним спектром. Рівень потужності вхідних сигналів, як правило, нижче рівня їх власних шумів. Подібні системи широко використовуються в області надвисоких частот (0,3 – 90 ГГц) для реєстрації та аналізу слабких (з інтегральною потужністю, меншою за 10^{-6} Вт) та дуже слабких (потужністю, меншою за 10^{-12} Вт) сигналів [1].

У каналах радіозв'язку можуть існувати також зовнішні завади та відбуватися спотворення сигналів, що передаються. Для передачі достовірної інформації, використовуються певні методи модуляції та кодування радіосигналів [6]. Проте об'єктивно залишаються джерела шумів та завад, які обмежують пропускну здатність каналів зв'язку у сучасних радіомережах. Наприклад, слід враховувати вплив взаємного відбиття хвиль, які поширюються в середовищі, від поверхонь будівель, землі, гір, тощо. Це спричиняє в першу чергу декілька шляхів поширення радіосигналів, а також їх частотно-селективне загасання, зміну несної частоти та зсув фази сигналу через ефект Доплера. Слід враховувати й групову заваду, яка створюється приймально-передавальними терміналами інших користувачів. Крім того для мм-діапазону характерні досить великі замирання сигналу у повітряному просторі, що також погіршує якість передачі інформації [6].

Традиційним методом підвищення завадостійкості радіомереж є розділення каналів приймання – передачі між базовими станціями та абонентами. Технічно це реалізується рознесенням у часі, просторі, частоті та поляризації хвиль, а також методом просторово-часового кодування [7]. Найбільш поширеними останніми роками є метод передачі багаточастотних сигналів, які є набором ортогональних піднесних та кодового розділення (CDMA).

У третьому поколінні стільникового зв'язку діє система кодового розділення каналів CDMA (Code Division Multiple Access). Основою CDMA є використання декількох технологій доступу з унікальним кодуванням сигналів, що дозволяє реалізовувати зв'язок декількох абонентів через один фізичний канал. Тобто в одному і тому ж каналі може працювати декілька приймачів з різними кодами (рис. 1.2).

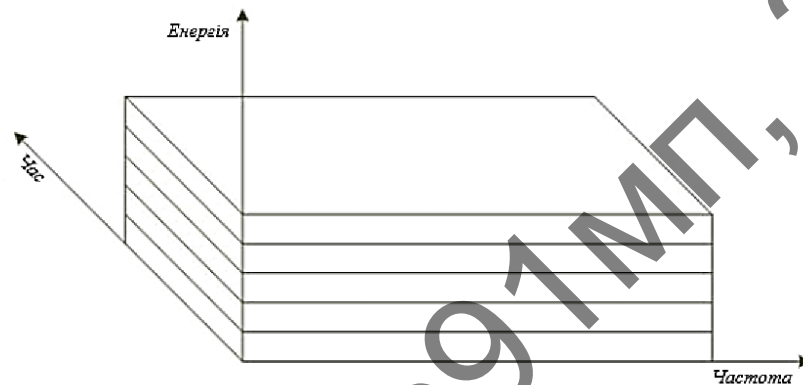


Рисунок 1.2 — Розділення каналів в CDMA

Застосування на практиці такої технології, збільшує кількість сигналів, що передаються без спотворення, в заданій смузі частот. Базовий стандарт CDMA, або IS-95, і сьогодні використовується в мобільній телефонії 3G. CDMA задає більш високу порівняно з іншими методами швидкість передачі даних. Принцип дії методу CDMA базується в розширенні спектру вихідного інформаційного сигналу, що реалізується одним із методів Direct Sequence (пряма послідовність), оснований на використанні шумоподібних сигналів (рис. 1.3).

Метод передбачає кодування інформаційного сигналу єдиним та унікальним в своєму роді способом, причому закодований сигнал можна вважати псевдовипадковим шумовим сигналом, який, у свою чергу, розширює спектр вихідного інформаційного сигналу. Вид обвідної такого сигналу приведено на рисунку 1.4. В результаті модуляції вузькосмуговий сигнал кожної абонентської станції розширюється на всю ширину спектру, що виділяється для користування мережею. В приймачі сигнал перетворюється за допомогою ідентичного коду (декодується), в результаті чого сигнал повертається до свого первинного вигляду

до передачі, у той час як сигнали інших користувачів для самого приймача залишаються кодованими і сприймаються як шум.

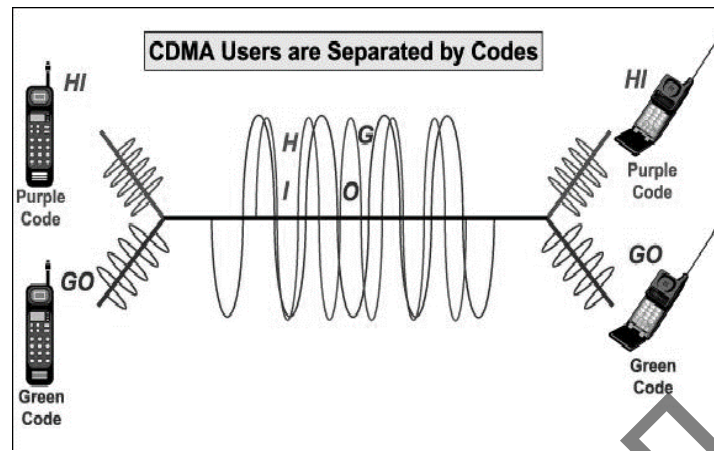


Рисунок 1.3 – Принцип роботи методу прямої послідовності

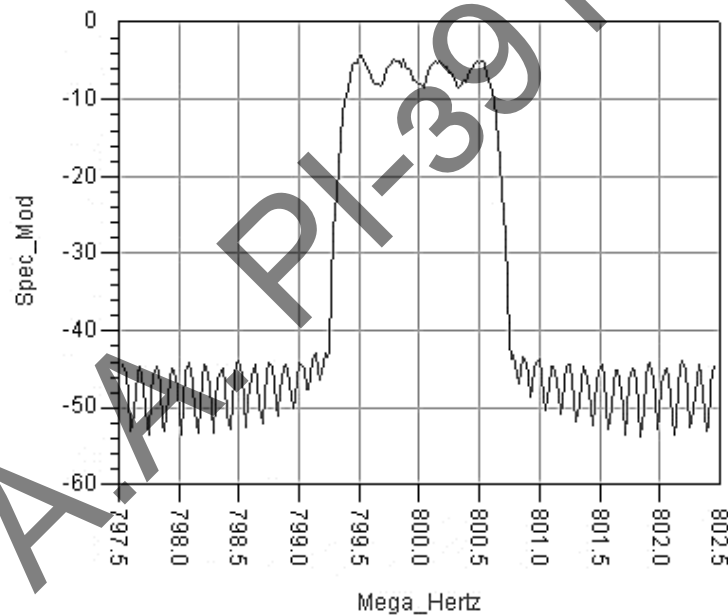


Рисунок 1.4 – Спектр шумоподібного CDMA сигналу [3]

1.2 Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням

З метою підвищення надійності та швидкості передачі даних в бездротових мережах застосовують мультиплексування з ортогональним частотним розділенням (OFDM, *англ.*: Orthogonal frequency-division multiplexing), що є способом передачі великих обсягів цифрових даних через канал з високим рівнем завад.

Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів — метод цифрової модуляції, який використовує велику кількість близько розташованих ортогональних піднесних. Кожна з них модулюється за звичайною схемою модуляції (наприклад, квадратурна, амплітудна модуляція) на низькій символівній швидкості [6]. Загальна швидкість передачі даних при цьому зберігається, як і у випадку схеми звичайної модуляції однієї несної в тій же смузі пропускання. На практиці сигнали OFDM створюються шляхом використання швидкого перетворення Фур'є (FFT). При частотному розділенні каналів необхідно забезпечити умови, при яких ширина окремого каналу з одного боку має бути відносно вузькосмуговою для мінімізації спотворення сигналу в межах одного каналу, а з іншого боку потрібно забезпечити достатню широкую смугу частот для забезпечення заданої швидкості передачі даних.

Окрім того, для підвищення ефективності використання всієї частотної ширини каналу, розділеного на підканали, бажано якомога щільно розташувати частотні підканали. Проте при цьому слід уникати міжканальної інтерференції для забезпечення повної незалежності каналів [6].

Канали зв'язку, що задовольняють вище описані вимоги є ортогональними. Кожен з несних сигналів будь якого з частотних підканалів (а точніше, певні функції, що описують досліджувані сигнали) є ортогональні між собою. Математично ортогональність описується формулою 1.1 та означає, що на певному інтервалі усереднений добуток функцій дорівнює нулю:

$$\int_0^T \sin(2\pi f_k t) \cdot \sin(2\pi f_l t) dt = 0, k \neq l \quad (1.1)$$

де T — тривалість символу в секундах, f_k, f_l — несні частоти в герцах k -го та l -го каналів.

Як видно з (1.1), ортогональність сигналів виконується в тому випадку, коли несний сигнал здійснює ціле число коливань за час тривалості одного символу [6,7].

Оскільки кожен символ тривалістю T передається обмеженою синусоїдальною функцією, то її спектр (рис. 1.5) описується я

$$P = \frac{\sin 2\pi(f - f_i)}{2\pi(f - f_i)} \quad (1.2)$$

де f_i — центральна частота i -го каналу.

Подібною ж функцією описується форма частотного підканалу. Таким чином, відсутність міжканальної інтерференції виконується навіть, якщо частотні підканали можуть перекривати одне одного, оскільки ортогональність несних сигналів гарантує частотну незалежність каналів.

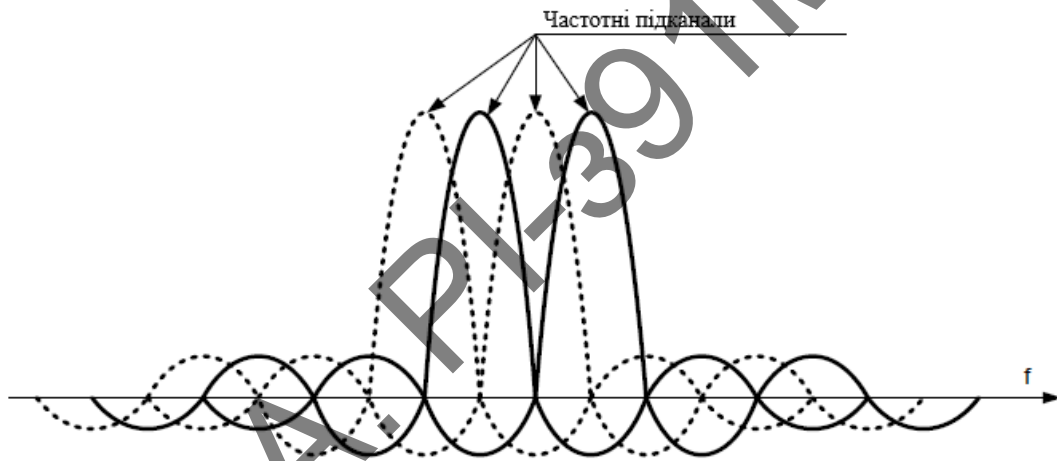


Рисунок 1.5 — Частотне розділення каналів з ортогональними несними частотами [6]

Отже OFDM характеризується значним перекриттям спектрів сусідніх несних частот, що дозволяє суттєво зменшити значення частотного розкиду та підвищити спектральну ефективність системи зв'язку.

Для виконання умов ортогональності необхідно щоб частотний розкид між несними частотами був постійним і точно дорівнював значенню $\Delta f = 1/T$. Тобто на проміжок одного інтервалу T був кратним різниці частот ($f_2 - f_1$).

Поняття захищеного інтервалу є невід'ємною частиною технології OFDM, що передбачає циклічне повторення кінця символу, який записано на його поча-

тку, тобто в захисному інтервалі передається фрагмент корисного сигналу, що гарантує збереження ортогональності несних прийнятого сигналу.

Традиційні сигнали з OFDM використовують прямокутну форму обвідної спектру, тому спектральна функція $F_A(\omega)$ описується виразом

$$F_A(\omega) = A_0 T_s \frac{\sin(\pi f T_s)}{\pi f T_s}. \quad (1.3)$$

При $\omega = 2\pi f_0$ спектр такого сигналу має форму, показану на рисунку 1.6

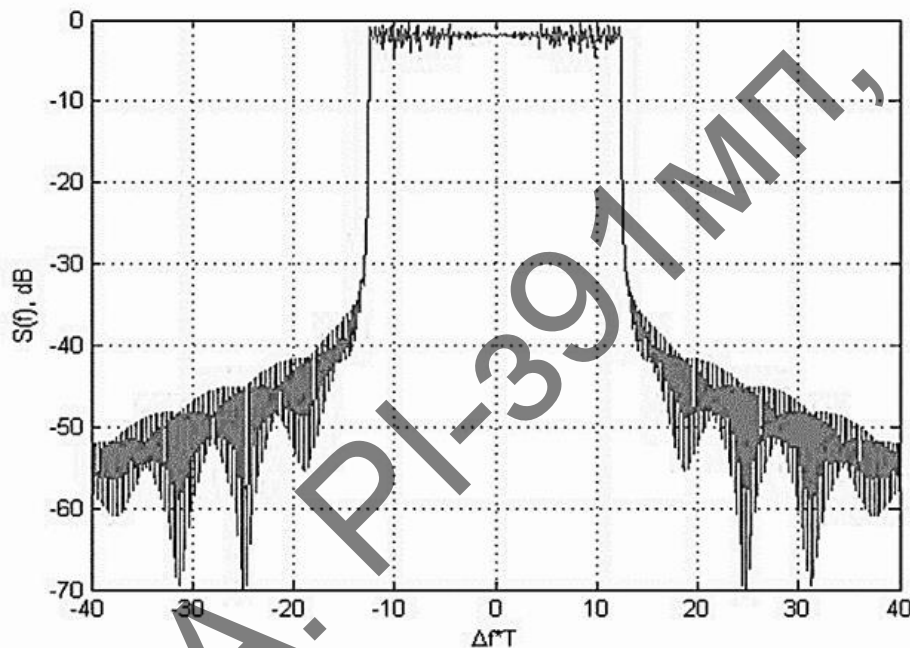


Рисунок 1.6 ← Спектр сигналу з OFDM (QPSK N=128) [6]

Аналіз методів формування інформаційних сигналів сучасних систем бездротового зв'язку (CDMA, TDMA, OFDMA та інших) показує, що вони за спектральною характеристикою схожі на шумові сигнали. Тому для реєстрації певних енергетичних параметрів, а також виявлення таких сигналів у каналі зв'язку можна використовувати радіометричні методи та засоби.

Основними задачами захисту інформації в телекомунікаційних мережах є, по-перше, забезпечення цілісності передачі даних, а по-друге, усунення можливості витоку інформації, і відповідно несанкціонованого доступу (НСД) до неї. Одним із заходів, що дозволяє вирішувати ці питання є проведення радіомоніторингу, тобто вистежування змін характеристик радіоканалу, і перш за все, рівню

сигналів та завад. Це дозволяє виявляти порушення умов конфіденційності (наявність сигналів закладних пристроїв) і цілісності інформації (підвищення рівня завад та шумів, в радіоканалі). Причому у випадку використання технологій CDMA під завадами слід розуміти також сигнали інших абонентів, які використовують даний радіоканал. При проведенні радіомоніторингу слід звернути увагу, що в цьому випадку інформаційні сигнали можна розглядати як псевдовипадкові, тобто такі, що мають шумоподібний спектр.

Аналіз характеристик запропонованих на ринку технічних засобів, що використовуються у процесі проведення радіомоніторингу каналів бездротового зв'язку, показує, що їх основними недоліками є відносно високі вартість та вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу, а також ряд функціональних можливостей, які часто не використовуються при проведенні радіомоніторингу [8-13].

1.3 Засоби радіомоніторингу та захисту каналів зв'язку

1.3.1 Широко смуговий детектор електромагнітного поля

Одним з найбільш поширених засобів, що дозволяють оперативно здійснити радіомоніторинг є детектори електромагнітного поля. За їх допомогою досить швидко виявляються та локалізуються радіозакладні пристрої (РЗП), до яких, перш за все, відносять: радіомікрофони, телефонні радіоретранслятори, радіостетоскопи, приховані відеокамери з передачею інформації через радіоканал; технічні засоби систем просторового високочастотного опромінення, радіомаяки систем стеження за переміщенням об'єктів, стільникові телефони, радіостанції і радіотелефони тощо.

Типовим прикладом такого класу засобів є багатofункціональний пошуковий прилад ANDRE (Research Electronics International, LLC, США) [8]. Він призначений для виявлення джерел радіочастотного сигналу в ближній зоні прийому. Перевагами даного пристрою є широкий функціонал (широко смуговий детектор електромагнітного поля, приймач інфрачервоного діапазону, можливість переві-

рки віброакустичного захисту приміщення. Цей прилад виявляє всі основні типи пристроїв перехоплення інформації, зокрема, аудіо-, відео-, телефонні, інфрачервоні і натільні передавачі. Його зовнішній вигляд показано на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 — Зовнішній вигляд широкосмугового детектору поля Andre

Він має малі габарити і типові для даного класу приладів технічні характеристики, а саме:

- чутливість мінус 75 дБм (на частоті 3 ГГц) і мінус 85 дБм (500 МГц);
- пристрої виведення інформації (вбудований гучномовець, сенсорний ємнісний екран), USB порт для оновлення ПО та передачі файлів;
- автономне живлення (літієво-іонна акумуляторна батарея ємністю).

Проте ціна подібних пристроїв є високою, а ряд функцій не використовуються під час радіомоніторингу. У той же час недоліки є досить суттєвими, що обмежує його використання. Зокрема робочий діапазон частот лежить в відносно низькій області електромагнітного спектру (до 6 ГГц). Це не дозволяє використовувати його для моніторингу каналів систем зв'язку, зокрема тих, що працюють з технологією 5G [5].

1.3.2 Програмно-апаратні комплекси

Більш розвинутими з точки зору проведення радіомоніторингу каналів зв'язку є програмно-апаратні комплекси, до яких відносяться скануючі приймачі, з'єднані з ЕОМ. Комплекси забезпечують: виявлення випромінювання РЗП; пе-

ленгування їх у реальному часі; оброблення прийнятих сигналів, зокрема, з метою ідентифікації випромінювання радіозакладних пристроїв тощо. Найбільш відомі комплекси такого класу: OSC-5000 ("Oscor"), СРМ-7000 ("Акула"), ST031 ("Піранья") та інші. Щодо виявлення РЗ, більш поширеним є портативні комплекси: АРК-Д1 ("Крона-1"), АРК-ПК і багатоканальний комплекс контролю приміщень АРК-ДЗ ("Крона-2"). Ці прилади побудовані на базі скануючого приймача AR-3000A, функціональні можливості якого розширені за рахунок спеціально розробленого синтезатора частот, процесора швидкого перетворення Фур'є та 12-рядного аналого-цифрового перетворювача. У результаті забезпечується швидкість сканування 40-70 МГц/с у діапазоні частот 1-2000 МГц. Динамічний діапазон вхідних сигналів лежить у межах 55 – 58 дБ. Відмінними їх рисами є: можливість виявлення випромінювання РЗ, що працюють під прикриттям потужних станцій, розрізнення зовнішніх та внутрішніх джерел випромінювання для контрольованих приміщень; моніторинг випромінювання вбудованих портативних телевізійних камер та інше. До основних особливостей можна віднести запис спектральних характеристик прийнятих сигналів на жорсткий диск персонального комп'ютера (ПК) для їх подальшої обробки.

Характеристики типового представника даного класу засобів ЗІ, комплексу Delta X 100/4 такі [9]:

- швидкість обробки.....100 МГц/с;
- діапазон робочих частот.....40 кГц – 4400 МГц;
- час готовності.....45 с;
- роздільна здатність за частотою.....15 кГц;
- обсяг дискової пам'яті, витраченої за 24 години моніторингу...0,5 Гб;
- динамічний діапазон.....мінус 90 – мінус 10 дБм.

Ціна подібних комплексів досить висока, їх використання під час проведення робіт потребує високої кваліфікації технічного персоналу, а робочий діапазон частот лежить в відносно низькочастотній області, і таке обладнання не до-

зволяє здійснювати радіомоніторинг, зокрема систем зв'язку за технологією 5G [10].



Рисунок 1.8 — Зовнішній вигляд комплексу Delta X 100/4

1.3.3 Аналізатори спектру

Більш точні та змістовні вимірювання параметрів спектру радіосигналів можна здійснити за допомогою аналізаторів спектру, проте, це вимагає більшого часу та ресурсів для обробки результатів вимірювань. Аналізатор спектра радіочастот — це пристрій, за допомогою якого визначають розподіл енергії електромагнітного випромінювання в смузі частот. В результаті вимірювання визначається амплітуда та частота спектральної складової сигналу, що аналізується [11-13].

Аналізатори спектру є відносно складними пристроями з точки зору їх структурної будови, а їх використання для вирішення конкретних задач передбачає роботу висококваліфікованого користувача. Принцип роботи класичного аналізатора спектру супергетеродинного типу пояснюється на рис. 1.9, на якому представлено блок-схему пристрою [11].

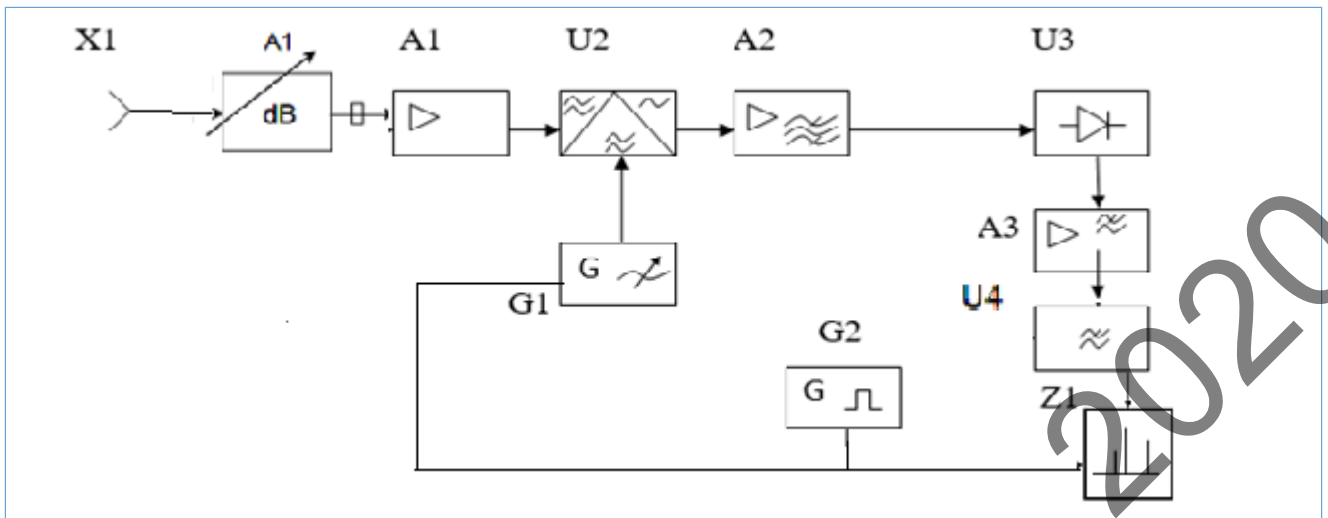


Рисунок 1.9 — Спрощена блок-схема аналізатора спектру $A1$ — атенюатор; $U2$ — перетворювач частоти; $G1$ — гетеродин; $A2$ — підсилювач проміжної частоти; $U3$ — детектор обвідної; $A3$ — підсилювач; $U4$ — фільтр низьких частот; $Z1$ — дисплей; $X1$ — джерело сигналу

Досліджуваний сигнал через атенюатор та фільтр нижніх частот ФНЧ поступає на один із входів змішувача, до іншого входу змішувача подається сигнал гетеродина. Оскільки змішувач містить нелінійний елемент, на його виході будуть не тільки сигнали із частотами двох первинних сигналів, а також їх гармоніки і сигнали з частотами, що дорівнюють сумі та різниці частот вхідного сигналу і гетеродина та їх гармоніки [11].

Вихідний сигнал зі змішувача проходить через блок проміжної частоти (ПЧ) та поступає на вхід підсилювача (де за потребою може здійснюватися логарифмічне перетворення) і далі — на детектор. В результаті на виході детектора виділяється обвідна сигналу, яка через фільтр нижніх частот подається до входу індикаторного блоку. В цьому блоці здійснюється остаточна цифро-аналогова обробка сигналу і результати реєструються на пристрої виводу інформації, як правило, дисплеї.

Аналізатор має вхідний мікрохвильовий атенюатор, який забезпечує номінальний для змішувача рівень сигналу, щоб уникнути явищ перевантаження

елементів вхідного тракту системи та спотворення сигналів. Отже атенюатор виконує захисні функції від перенавантаження і, зазвичай, регулюється автоматично, в залежності від заданого рівня потужності вхідного сигналу. Проте також можлива і ручна установка ослаблення.

На рис. 1.10 показано спрощена схема кола атенюатора з максимальним ослабленням 70дБ і кроком 2дБ. Конденсатор використовується для запобігання подачі до аналізатора сигналу постійного струму. Водночас він використовується для придушення низькочастотних сигналів, внаслідок чого підвищується нижня частота робочого діапазону аналізатора [11, 14].



Рисунок 1.10 — Схема вхідного кола атенюатора

Фільтр нижніх частот блокує проходження високочастотних сигналів в змішувач, що робить майже неможливим змішування позасмугових сигналів з сигналом гетеродина і, відповідно, виникнення небажаних коливань на проміжній частоті. У мікрохвильових аналізаторах спектру низькочастотний фільтр замінюється преселектором, який є фільтром, що перестроюється і пропускає сигнали тільки у вибраній смузі частот. Підсилювач ПЧ використовується для підстроювання вертикального положення сигналу на дисплеї без впливу на рівень сигналу у вхідному змішувачі. При змін рівня сигналу ПЧ, відносно нього змінюється значення рівня опорного сигналу і відбувається коректне відображення рівня вихідного сигналу на пристрої виведення інформації. Зазвичай, не потрібно, щоб опорний рівень змінювався зі зміною вхідного ослаблення, тому настроювання підсилювача ПЧ і вхідного атенюатора пов'язані, щоб відбувався

ефект зміни вхідного ослаблення і розмір зображення сигналу на дисплеї зберігався.

Ширина смуги фільтра — це один з факторів, що формує роздільну здатність аналізатора спектру. Стабільні параметри частоти гетеродина аналізатора, також, опорного генератора, як правило визначають роздільну здатність. Зазвичай, опорний генератор налаштовується струмом в діапазоні частот від 3 до 7 ГГц.

У таблиці 1.1 наведено основні технічні характеристики мобільного аналізатора спектру Aaronia SPECTRAN V5 (рис. 1.11), які найбільш важливі для проведення радіомоніторингу [12].

Таблиця 1.1 — Технічні характеристики портативного аналізатора спектру Aaronia SPECTRAN V5

Мінімальна робоча частота	9кГц			
Максимальна робоча частота	6 ГГц	12 ГГц	16 ГГц	20 ГГц
Час готовності	≤ 1 мкс			
Максимальна потужність	+20 дБм			



Рисунок 1.11 — Зовнішній вигляд аналізатора спектру SPECTRAN V5

1.3.4 Засоби передачі та виводу результатів вимірювань

Зв'язок з персональним комп'ютером (ПК) здійснюється, як правило, через послідовний порт вводу/виводу, що забезпечує обмін інформацією між двома

пристроями: шиною передачі даних комп'ютера та зовнішнім пристроєм. В сучасних ПК порт вводу USB (англ.: Universal Serial Bus), який інтегрований до шини передавання даних. Для зв'язку з периферійними пристроями до шини ПК підключені одна або кілька мікросхем контролера портів вводу/виводу, які зазвичай, підтримують інтерфейсні шини USB та FireWire. Останнім часом більш часто використовується універсальна послідовна шина, USB версій 2.0 та 3.0. У таблиці 1.2 наведені їх порівняльні характеристики.

Таблиця 1.2 — Порівняльні характеристики стандартів USB

Інтерфейс	Пропускна здатність, Мбіт/с	Максимальна довжина кабелю, м
USB 2.0	480	5,0
USB 3.0	5000	3,0

Найбільш суттєвою перевагою USB 3.0 є висока швидкість (до 5 Гбіт / с), яка в 10 разів перевищує швидкість порта попередньої версії. У нового інтерфейсу покращено енергозбереження і можна здійснити двосторонню передачу даних одночасно. Це дозволяє отримати високу швидкість передачі даних, якщо до одного порту підключити декілька пристроїв. Крім того, в інтерфейсі USB 3.0 була підвищена сила постійного струму до 900 мА. Недоліком нового інтерфейсу є габарити з'єднувального кабелю. Він більше за діаметром та коротше за довжиною (не може бути довшим 3 метрів).

1.4 Радіометричні методи вимірювання широкосмугових сигналів

Застосування приймальних систем радіометричного типу як технічних засобів для радіомоніторингу є достатньо обґрунтованим за результатами проведеного попереднього аналізу спектральних характеристик інформаційних сигналів, характерних для більшості сучасних та перспективних (5G) телекомунікаційних систем.

Радіометричні методи та засоби дають можливість вимірювати певні параметри сигналів досить низької 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. Радіометричні системи вимірюють параметри вказаних сигналів навіть у тому випадку, якщо їх середня потужність менша за середню потужність власних шумів у робочій смузі частот [15]. Це дозволяє з високою точністю визначати рівень шумів та завад у радіоканалі зв'язку, і таким чином не тільки виявляти сторонні сигнали (наприклад, сигнали РЗП), а також оперативно визначати пропускну здатність каналу, і таким чином, вирішувати дві основні задачі радіомоніторингу.

Одним з основних параметрів шумових сигналів є спектральна щільність потужності шуму (СЩПШ) [16]. У випадку шумоподібних сигналів аналогічним параметром буде спектральна щільність потужності вказаних сигналів, яку для зручності будемо позначати також СЩПШ. Визначення даної складової сигналу відбувається поетапно [15]:

- 1) фільтрація сигналів за частотою, умови (параметри) якої залежать від цілі досліджень, що проводяться;
- 2) нелінійне (гетеродинне) перенесення шумоподібного, досліджуваного, сигналу на виході фільтру на шумоподібний сигнал проміжної частоти (ПЧ) та подальше його підсилення та детектування;
- 3) так звана затримка сигналу в часі, відбувається для виділення постійної складової напруги, значення якої прямо пропорційне СЩПШ (або середній потужності) вихідного сигналу.

Приймач радіометричного типу або радіометрична система (РС) має такі складові [15]:

- блок НВЧ, у якому відбувається приймання та оброблення вхідних сигналів надвисокої частоти, а також змішування їх із сигналом гетеродина та отримання сигналу проміжної частоти (ПЧ);

- блок ПЧ, де, перш за все, сигнал ПЧ підсилюється, також певним чином оброблюється та проходить через квадратичний детектор;
- блок низькочастотного тракту, який призначений для оброблення інформаційного сигналу та на виході НЧ блоку маємо сигнал в вигляді постійної складової напруги, величина якої в свою чергу пропорційна потужності досліджуваного НВЧ сигналу.

Саме така особливість перетворення сигналів у тракті РС дозволяє її використання як технічний засіб для проведення моніторингу каналів зв'язку та виявлення витoku інформації. Особливу увагу при проектуванні РС надають вдосконаленню пристроїв НЧ тракту, оскільки покращення їх характеристик дозволяє значно понизити поріг чутливості РС [1].

Існує декілька основних схем побудови пристроїв такого типу [15].

Першу схему мікрохвильового приймача радіометричного типу запропонував науковець Р. Г. Дайк (Robert Henry Dicke), який займався дослідженням шумового електромагнітного випромінювання атмосфери Землі. Цей приймач працював на основі модуляційного методу, завдяки якому можна було реєструвати шумові електромагнітні сигнали з величиною СЦПШ від 10^{-22} Вт/Гц і більше. Запропонований приймач [2] був використаний для визначення температури віддалених фізичних об'єктів через виміряне у надвисокочастотному діапазоні значення СЦПШ. Тому даний пристрій відноситься до радіометричних систем модуляційного типу, принцип дії яких детально розглянуто в літературі (див., наприклад, [15]). Навіть в сьогоднішні дні РС такого типу знаходять застосування в інших областях науки та техніки [2].

Реєструвати низькоінтенсивні шумоподібні сигнали, що створюються у результаті теплового руху заряджених або поляризованих частинок цілком можливо використовуючи подібні радіометричні методи.

Джерелами таких сигналів є фізичні тіла, що складаються з нагрітих до температури вище зовнішнього середовища частинок. В результаті теплового руху зазначених частинок, який відноситься до випадкових процесів, спричиняє виникнення електромагнітного випромінювання, параметри якого також є випа-

дковими величинами, а поле має флуктуаційний характер [16]. Спектр такого випромінювання є шумовим та описується відомим законом Планка

$$p = hf \left[\frac{1}{\exp(hf/kT) - 1} + \frac{1}{2} \right], \quad (1.4)$$

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

Температура джерела, що досліджується, прямо впливає на максимальну інтенсивність. Таке електромагнітне випромінювання має широкий діапазон частот і називається тепловим електромагнітним шумом і описується термодинамічними законами, характерними для рівноважних процесів [15, 16]. Спектр випромінювання у повній термодинамічній рівновазі не залежить від природи речовини, а визначається, у загальному випадку, законом Планка (1.4). РС дозволяє визначити не абсолютне значення за формулою (1.4), різницю між СЦПШ досліджуваного об'єкта (p) та СЦПШ власних шумів (p_{PC}), тобто надлишкове значення СЦПШ [16] за формулою

$$\Delta p = p - p_{PC} = hf \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{k(T_0 + \Delta T)}\right) - 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{kT_{PC}}\right) - 1} \right). \quad (1.5)$$

Дана формула значно спрощується для радіодіапазону, оскільки $hf/kT_0 \ll 1$. 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

$$\Delta p = p - p_0 = hf \left(\frac{k(T_0 + \Delta T)}{hf} + \frac{kT_0}{hf} \right), \text{ звідси } \Delta p = k\Delta T, \quad (1.6)$$

де Δp — надлишкова СЦПШ 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 1 – 100 ГГц [1, 2, 4, 15].

Отже проведення радіомоніторингу радіометричними засобами дозволяє достатньо точно, по-перше, визначити рівень власних теплових шумів фізичного середовища каналу зв'язку, по-друге, рівень шумоподібних інформаційних сигналів та завад, і таким чином — пропускну здатність радіоканалу.

Оцінити пропускну здатність каналу зв'язку можна за допомогою теореми Шеннона, яка дозволяє визначити кількість інформації, що передається через канал в одиницю часу (іншими словами, швидкість передачі даних), яка характеризує пропускну здатність каналу. Теорема може бути сформульована в простих термінах таким чином.

1. Певна система через канал зв'язку може передати дані з максимальною швидкістю C (у біт/с), відомою як пропускна здатність каналу.
2. Якщо швидкість передачі інформації R менше, ніж C , то передача даних в присутності шуму може відбуватися зі як завгодно малими ймовірностями помилок з використанням методів інтелектуального кодування.
3. Щоб отримати більш низькі ймовірності помилок, кодуєчий пристрій (кодер) має працювати з більш довгими блоками даних сигналу.
4. Шенноном доведено, що пропускна здатність (C) визначається за формулою

$$C = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right) \quad (1.7)$$

де P_s — потужність корисного передавача, P_n — сумарна потужність завади в каналі, Δf — смуга робочих частот.

Теорема Шеннона вказує, що при будь-яких методах кодування інформації, об'єм якої наближається до максимальної пропускну здатності каналу, можлива передача цієї інформації з відносно низьким рівнем помилок. Інтуїтивно зрозуміло, що для даної системи зв'язку при збільшенні швидкості передачі інформації кількість помилок в секунду також буде збільшуватися.

Проте максимальну швидкість передачі даних, тобто пропускну здатність каналу зв'язку сучасних телекомунікаційних систем достатньо просто можна ви-

значити за допомогою радіометричних приймачів, оскільки всі сигнали та завади мають шумоподібний характер.

Висновки до розділу 1

У більшості телекомунікаційних систем застосовується радіоканал, який є фізично відкритим середовищем передачі даних. Тенденція розвитку таких систем свідчить про використання все більш високочастотних діапазонів, зокрема міліметрового, а також про суттєве зростання кількості передавачів та приймачів, що функціонують одночасно. Все це потребує вдосконалення методів та засобів захисту інформації, зокрема радіомоніторинга.

Аналіз методів модуляції, які використовуються в радіомережах для передачі даних, та причин виникнення завад, показує, що інформаційні сигнали і завади є широкосмуговими, а за спектральним складом — шумоподібними.

У той же час відомі технічні засоби захисту інформації, зокрема скануючі приймачі, призначені для проведення радіомоніторингу в дециметровому та сантиметровому діапазонах. Проте, радіометричні системи більш прості за структурою та мають чутливість за потужністю в 10-100 разів вищу, ніж зазначені приймачі та аналізатори спектру. За допомогою приймальних радіометричних систем рівень шуму у каналі зв'язку та його пропускну здатність, зокрема й в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Таким чином, актуальність застосування радіометричних систем для проведення радіомоніторингу каналів зв'язку пояснюється стійкою тенденцією використання все більш високочастотних ділянок електромагнітного спектру, включаючи міліметровий діапазон. Аналіз радіометричних методів обробки сигналів показує можливість їх застосування принаймні для вирішення двох головних задач радіомоніторингу щодо конфіденційності та цілісності інформації.

2 РАДІОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД МОНІТОРИНГУ КАНАЛУ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТА ЙОГО ОБГРУНТУВАННЯ

Стрімке зростання швидкості передачі даних в телекомунікаційних системах потребує згідно формулі Шеннона (1.7) суттєвого збільшення смуги робочих частот каналу Δf , що може бути реалізовано через підвищення несної частоти інформаційних радіосигналів, тобто використанням більш високочастотних діапазонів. Зокрема у мм-діапазоні функціонують системи супутникового зв'язку [17], і передбачається його використання за стандартами стільникового зв'язку 5G [5]. Крім того, в бездротових радіомережах впроваджується широкосмугового зв'язок [18].

Все це вимагає розробки нових методів та засобів, приймальної та реєструючої апаратури, зокрема, засобів, які дозволяють здійснювати радіомоніторинг каналу зв'язку. Причому з розвитком технологій зв'язку нагальною потребою стає реєстрування надширокосмугових сигналів (НШС), які мають шумовий спектр зі спектральною щільністю потужності, меншою за 10^{-10} Вт/Гц.

Одним з напрямків розроблення засобів реєстрації може бути створення високочутливих радіометричних систем, які розроблялися останнім часом для потреб радіоастрономії, біомедицині, радіометрії земних об'єктів тощо [4, 15].

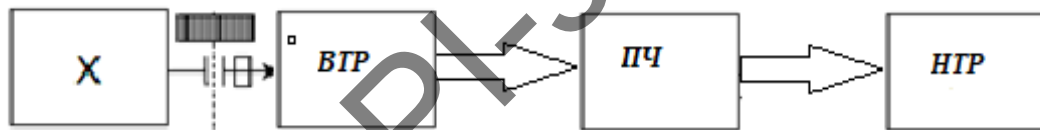
В даному розділі розглядаються результати дослідження щодо можливості використання радіометричної системи (РС) як засобу радіомоніторингу та пропонується метод його реалізації. Крім того визначаються способи вдосконалення окремих вузлів її низькочастотного тракту, з метою покращення технічних характеристик РС. Дослідження проводились за допомогою радіометричної системи частотного діапазону мм-діапазону, яка має смугу робочих частот (37 – 53 ГГц) у додатковому спектрі стільникового зв'язку 5G.

2.1 Принцип роботи приймальної радіометричної системи моніторингу каналу зв'язку

Спрощена блок-схема приймальної системи радіометричного типу, яку можна використовувати для проведення радіомоніторингу, наведена на рис. 2.1.

Високочастотний тракт (ВТР) такої системи є хвилеводним, до якого входять: змінний атенюатор, р-і-п модулятор, феритові вентилялі, гетеродин (НВЧ генератор синусоїдальних сигналів) та перетворювач частоти.

Досліджуваний сигнал надвисокої частоти від джерела X , потрапляє до блоку високочастотного тракту, де здійснюється модуляція його амплітуди та встановлюється певний рівень потужності за допомогою змінного прецизійного атенюатора (ослаблення якого враховується в остаточному визначенні рівню потужності досліджуваного сигналу).



Рисункок 2.1 — Спрощена блок схема радіометричної системи:

X — джерело сигналу; ВТР — високочастотний тракт радіометра; ПЧ — блок проміжної частоти; НТР — низькочастотний тракт радіометра

В блоці ПЧ здійснюється перенесення сигналу на проміжну частоту та підсилення сигналу ПЧ який має теж шумоподібний спектр та амплітудну модуляцію. У результаті квадратичного детектування виділяється низькочастотна обвідна ПЧ-сигналу, амплітуда якої пропорційна потужності вхідного НВЧ сигналу, ослабленого атенюатором.

Остаточна обробка досліджуваного сигналу відбувається в блоці низькочастотного тракту. Після підсилення НЧ сигнал проходить через біквдратний вузькосмуговий фільтр, який суттєво зменшує рівень фліккер-шуму, що створюється у попередній частині радіометричного тракту. Після детектування на виході

фільтра нижніх частот створюється сигнал постійної напруги, величина якої пропорційна потужності сигналу на виході змінного НВЧ атенюатора. Наприкінці аналого-цифрове перетворення сигналу дозволяє провести остаточну його обробку програмно-апаратними засобами.

2.2 Обґрунтування вибору структурної схеми приймальної системи для радіомоніторингу

За методом перетворення вхідного сигналу в радіометричному тракту системи даного класу поділяються на такі типи: компенсаційні, кореляційні та модуляційні. Відповідним чином класифікуються структурні схеми РС та методи перетворення сигналу. Недоліками компенсаційних і кореляційних радіометрів є наявність значної низькочастотної флуктуації загального коефіцієнта передачі РС, їх більш складна конструкція тощо. На противагу цьому вони мають більш високу чутливість, або більш низький поріг чутливості [15].

Проте, теоретично доведено, що висока чутливість РС з компенсаційним методом перетворення обумовлена принципом дії, суть якого полягає у тому, що власні шуми системи компенсуються шумоподібним допоміжним сигналом джерела опорного сигналу (джерела опорної напруги) [15]. Проте через складність компенсації низькочастотних флуктуацій коефіцієнта передачі радіометричного тракту цю перевагу не завжди можна реалізувати.

Компенсаційний радіометр, спрощена структурна схема якого приведена на рис. 2.2, містить у своєму складі вхідний надвисокочастотний підсилювач ($A1$), квадратичний детектор ($U1$), фільтр нижніх частот ($Z1$), джерело опорної напруги ($ДОН$), пристрій порівняння ($A2$) та індикатор ($P1$). Отже подібна приймальна система реалізує пряме перетворення вхідного сигналу.

Чутливість компенсаційного радіометра визначається формулою [1]

$$\Delta P_{\text{КМП}} = 1,41 P_{\text{Ш}} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}, \quad (2.1)$$

де: $P_{\text{Ш}}$ — потужність шуму приймального каналу радіометра;

ΔF — смуга пропускання фільтра на виході квадратичного детектора;

Δf — смуга пропускання підсилювача високої частоти ($A1$).

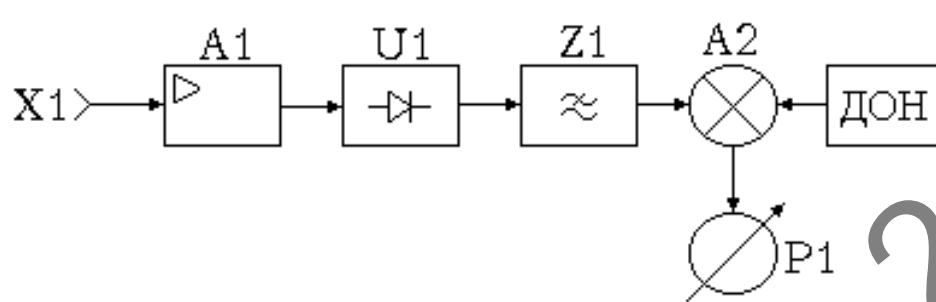


Рисунок 2.2 — Структурна схема компенсаційного радіометра [1]

Інший метод, який використовується на практиці для вимірювання потужності шумових сигналів використовують — кореляційний. Спрощена блок-схема кореляційного радіометра приведена на рис. 2.3.

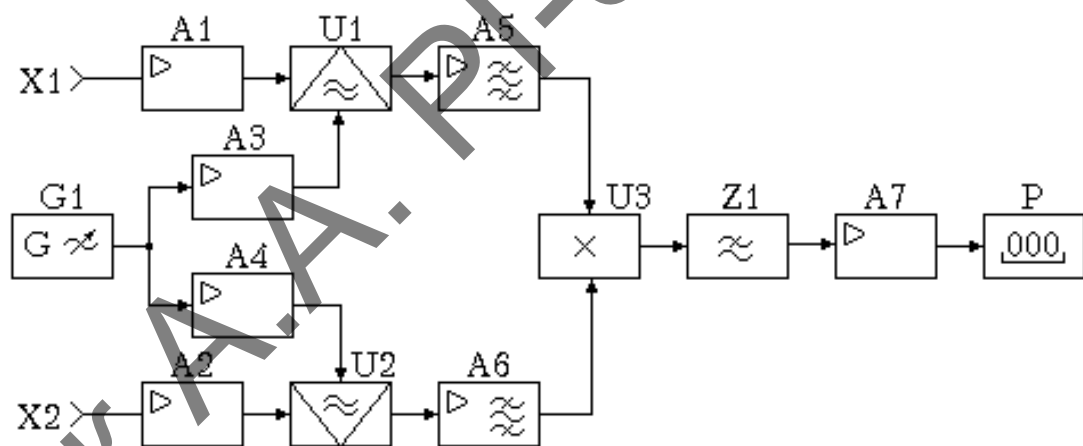


Рисунок 2.3 — Структурна схема кореляційного радіометра [1]

Радіометр даного типу складається з двох ідентичних (дзеркальних) каналів, у кожному із яких на вході включені приймальні антени ($X1$, $X2$), підсилювачі високої частоти ($A1$, $A2$), гетеродин ($G1$), перетворювачі ($U1$, $U2$) та буферні підсилювач проміжної частоти ($A3$, $A4$). Досліджувані сигнали, які можуть створюватись різними джерелами ($X1$) та ($X2$) після перетворення у НВЧ частинах відповідних каналів поступають до підсилювачів проміжної частоти ($A5$) та

(А6), а після підсилення — до перемножувача (U3). Фільтром нижніх частот (Z1) виділяється низькочастотна складова результату множення сигналів, яка після підсилення подається на вхід реєструючого пристрою або індикатора (P1) [15].

Кореляційний радіометр (корелометр) дозволяє апаратно визначати функції взаємної кореляції двох сигналів, а також функцію автокореляції будь-якого шумоподібного сигналу. У такому разі на один з входів радіометра подається певний сигнал, а на іншій — той же сигнал, але з часовим зсувом.

За відсутності сигналу на виході кореляційного радіометра (рис. 2.3) спостерігається сигнал, напруга якого пропорційна потужності власних шумів РС

$$P_{\text{крл.1}} = \int I_{\text{ш1}}(f) I_{\text{ш2}}(f) df, \quad (2.2)$$

проте її значення має знакозмінний характер. У формулі (2.2) інтенсивності шумів відповідних каналів корелометра позначені як $I_{\text{ш1}}$, $I_{\text{ш2}}$.

Під час подачі на входи корелометра зовнішніх надвисокочастотних сигналів $X_1(t)=X_2(t)=X(t)$ на виході перемножувача U3 виникає сигнал, напруга якого пропорційна сумі потужностей власних шумів каналів системи та досліджуваного сигналу

$$P_{\text{крл.2}} = \int I_{\text{ш1}}(f) I_{\text{ш2}}(f) df + P_{\text{крл.1}} = \int X^2(f) df. \quad (2.3)$$

Друга складова виразу (2.3) зміщує результуючий сигнал в область додаткових значень. Ця позитивна величина реєструючим пристроєм корелометра.

Чутливість кореляційного радіометра визначається за формулою [15]

$$\Delta P_{\text{крл}} = 2 P_{\text{ш}} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}. \quad (2.4)$$

Корелометри забезпечують більш високий поріг чутливості, ніж компенсаційні радіометри: з формул (2.3) та (2.4) видно, що $\Delta P_{\text{крл}} / \Delta P_{\text{кмп}} = 1,41$.

Проте найчастіше для реєстрації шумоподібних сигналів застосовуються третій, модуляційний метод. Використання апаратури з таким методом перетворення вважається більш перспективним в мікрохвильовій [15]. Спрощена структурна схема модуляційного радіометра наведена на рисунку 2.4.

Функціонує приймач шумоподібних сигналів даного типу таким чином. Сигнал через антену $X1$ поступає до блоку комутатора $U1$, який перемикається з низькою частотою Ω (меншою за частоту сигналу). На виході комутатора маємо модульований сигнал. Враховуючи, що приймач має власні шуми, за кожний півперіод комутації на виході квадратичного детектора отримаємо

$$\begin{aligned} i'_{\text{КВД}} &= K_I \cdot [I_{\text{Ш}}(t) + U^2_c(t)] & 0 < t < \pi/\Omega, \\ i''_{\text{КВД}} &= K_I \cdot I_{\text{Ш}}(t) & \pi/\Omega < t < 2\pi/\Omega, \end{aligned} \quad (2.5)$$

де K_I — коефіцієнт перетворення квадратичного детектора;

$I_{\text{Ш}}$ — інтенсивність спектральної щільності власних шумів приймача.

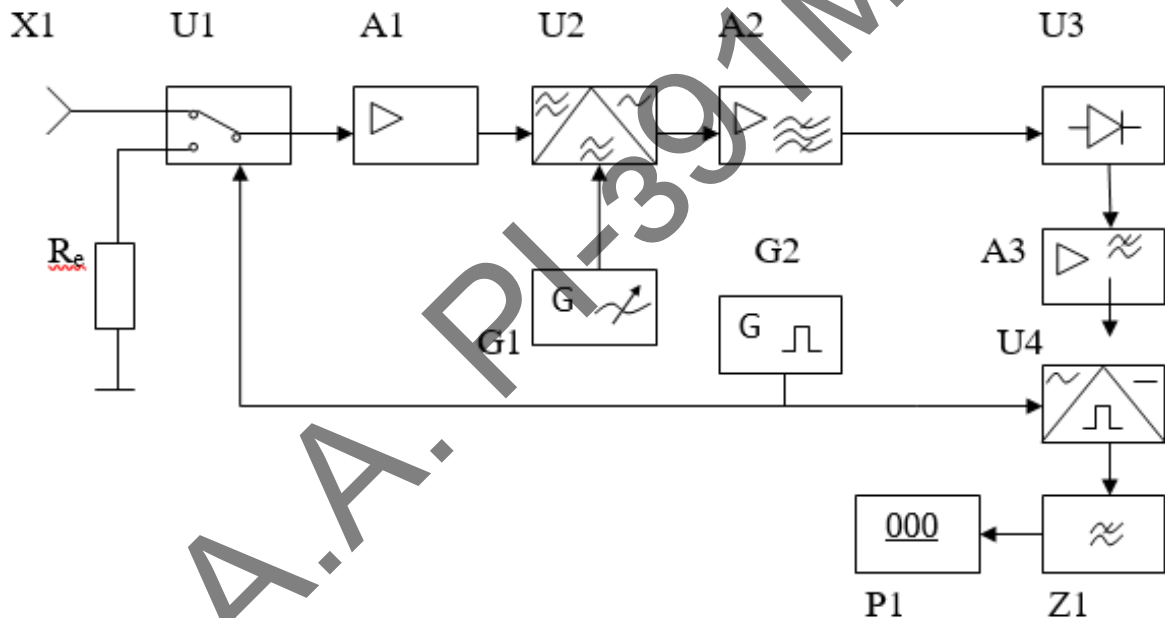


Рисунок 2.4 — Структурна схема радіометра модуляційного типу:

$X1$ — вхідна антена; R_e — еквівалент антени; $U1$ — комутатор; $A1$ — підсилювач; $U2$ — перетворювач частоти; $G1$ — гетеродин; $A2$ — підсилювач ПЧ; $U3$ — квадратичний детектор; $A3$ — підсилювач НЧ; $U4$ — синхронний детектор; $G2$ — генератор комутуючих імпульсів; $Z1$ — фільтр нижніх частот; $P1$ — індикаторний пристрій

У синхронному детекторі $U4$ здійснюється демодуляція шляхом перемноження отриманого сигналу та сигналу опорної модуляції (як правило, у ви-

гляді меандру частотою 1–10 кГц). Вихідна напруга $U4$ містить постійну та низькочастотні складові. За допомогою фільтра нижніх частот з відповідною АЧХ виділяється постійна напруга, пропорційна потужності вхідного НВЧ сигналу

$$P_C = K_2 U_C^2 / 4, \quad (2.6)$$

де K_2 – коефіцієнт перетворення синхронного детектора.

Один із перспективних варіантів побудови модуляційного радіометра з перетворенням вхідної частоти та використанням пристрою зміщення частоти (ПЗЧ) наведений на рисунку 2.5.

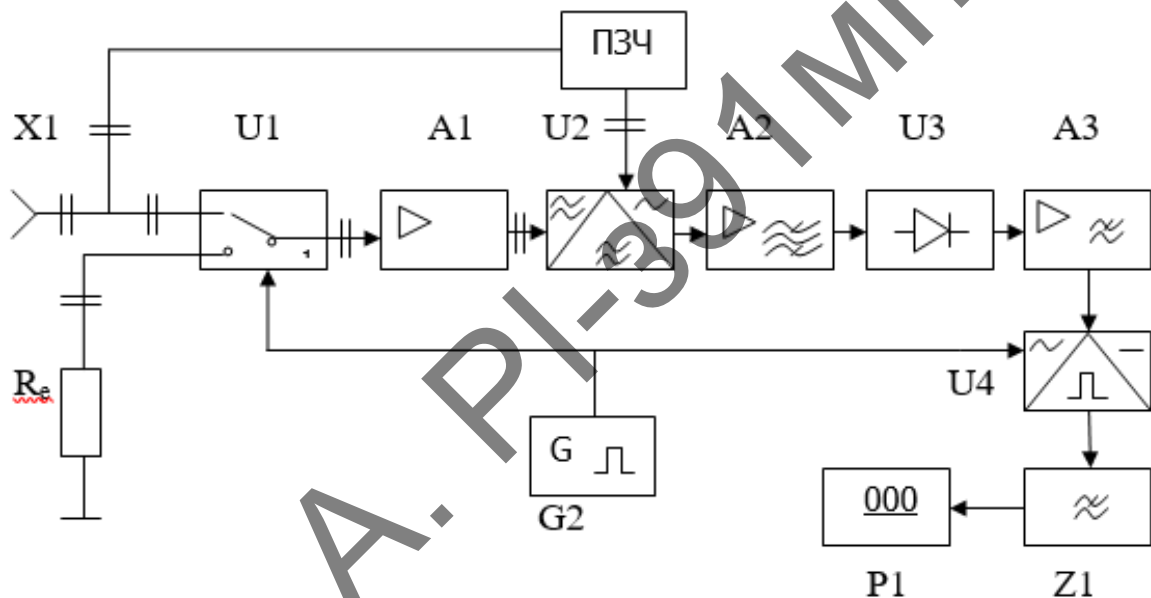


Рисунок 2.5 — Модуляційний радіометр на основі пристрою зміщення частоти [15]

Вхідний сигнал з антени $X1$ подається до дільника потужності, і далі, відповідно до комутатора $U1$ та пристрою зміщення частоти (ПЗЧ). ПЗЧ містить аналогові або дискретні фазообертачі та забезпечує зсув частотного спектра вхідного сигналу на значення вибраної проміжної частоти ω_1 . На вході ПЗЧ формується сигнал частоти зміщення

$$U_{u1} = \frac{U_c \cdot U_1}{2} \cdot \cos(\omega \pm \omega_1)t. \quad (2.7)$$

Сформований сигнал надходить до входу змішувача частоти (U_2), на другий вхід якого подається монохроматичний сигнал виду

$$U_c(t) = U_c \cdot \sin(\omega t + \varphi) t. \quad (2.8)$$

В результаті перетворення сигналів на виході змішувача U_2 отримаємо [15]

$$\begin{aligned} U_{U1} &= \frac{U_c^2 \cdot U_1}{4} \cdot [\cos(\omega - \omega_1 - \omega) t + \cos(\omega + \omega_1 + \omega) t] \\ &= \frac{U_c^2 \cdot U_1}{4} \cdot \cos \omega t + \frac{U_c^2 \cdot U_1}{4} \cdot \cos(2\omega + \omega_1) t. \end{aligned}$$

Перша складова сигналу виділяється селективним фільтром підсилювача A_2 , а друга придушується. Подальше перетворення відбувається аналогічно до попереднього прикладу. Використання пристрою зміщення частоти дещо спрощує процес перетворення вхідної частоти, проте потребує для своєї реалізації відпрацьовані НВЧ-схеми фазочастотних перетворювачів.

Чутливість модуляційного радіометра визначається як [15]

$$\Delta P_{МД} = 2\sqrt{2} \cdot P_{Ш} \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}$$

Формула показує, що у модуляційного радіометра чутливість в 2 рази гірша, ніж у компенсаційного і в $\sqrt{2}$ — ніж кореляційного радіометра. Проте, на практиці вона може бути кращою, ніж у радіометра згаданих типів [15]. У свою чергу простота реалізації модуляційних РС, надійність у роботі привабливіші для вимірювання потужності низькоінтенсивних випромінювань мм-діапазону.

Таким чином, аналіз можливостей та схем побудови РС з врахуванням методів формування інформаційних сигналів сучасних систем бездротового зв'язку (за стандартами CDMA, TDMA, OFDMA та інш.) [18, 19–22] показує перспективність використання у мм-діапазоні довжин хвиль модуляційних радіометричних систем. Причому на відміну від традиційної апаратури (селективні вольтметри, аналізатори спектру, панорамні приймачі) [11–13,] такі приймачі дозволяють

безпосередньо реєструвати інтегральні характеристики надширокополосних сигналів з низьким рівнем середньої потужності [15, 22].

Частотний діапазон робочих частот сучасних засобів захисту інформації, зокрема, тих, що призначені для проведення радіомоніторингу, лежить у дециметровому та нижній частині сантиметрового діапазону [8–10]. Крім того, вони реєструють, як правило, вузькосмугові сигнали та мають високий поріг чутливості. Зазначені недоліки роблять неможливим їх використання для захисту інформації у багатьох системах бездротового зв'язку, зокрема у мм-діапазоні.

2.3 Аналіз методів передачі даних через радіоканал зв'язку міліметрового діапазону

Канальний кодер, декодер, модулятор і демодулятор є стандартними елементами системи передачі даних [23]. Модулятор і демодулятор мають по два входи, що безпосередньо з'єднуються з генератором псевдовипадкових сигналів, який модулюється інформаційним сигналом, а результуючий сигнал є, у свою чергу, модулюючим для сигналу радіочастоти. В приймачі використовується аналогічна система в зворотній послідовності. На рисунку 2.6 зображено спрощену блок-схему цифрової системи зв'язку з широкополосними сигналами для передачі повідомлень в двійковій системі.

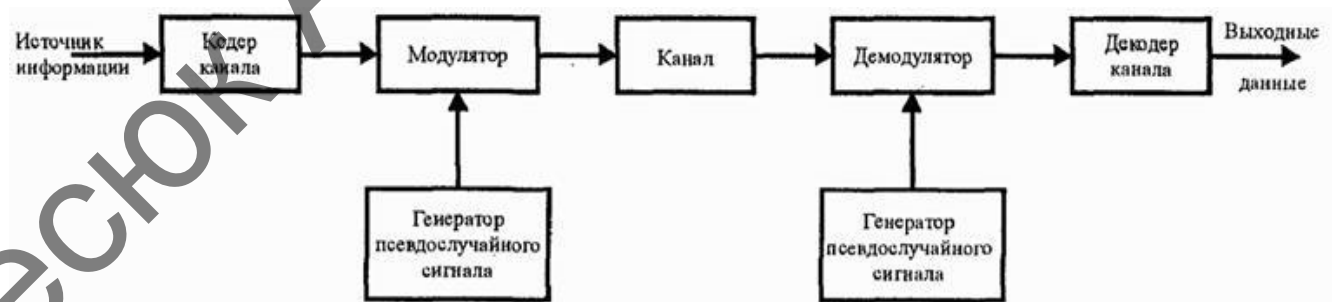


Рисунок 2.6 — Модель цифрової системи зв'язку з широкополосним каналом

Причому, для демодуляції потрібна синхронізація псевдовипадкової послідовності, що генерується на прийомі, з послідовністю, що міститься в прийнятому сигналі [24]. Робота радіопристроїв в одній відносно вузькій частотній смузі виділеного діапазону є однією з основних проблем щодо технічно правильно функціонування приймально-передавальної апаратури, оскільки в такому випадку підвищується можливість спотворення інформаційного сигналу, що передається.

Крім того, завади можуть генеруватись побутовими приладами, бездротові камерами спостереження, пристроями прослуховування, GPS трекерами тощо.

Можливості формування більш довгих, а відповідно й більш схожих на випадкові послідовності, з врахуванням великої чисельності передавачів, значно залежать від основних характеристик радіоканалу:

- пропускної здатності;
- спектральної ефективності;
- енергетичної ефективності.

Усі ці характеристики визначаються співвідношенням сигнал/шум, причому під шумом слід розуміти як тепловий шум радіоканалу так і різного типу завади.

Пропускна здатність (C) визначається за формулою Шенона (1.7).

Спектральна ефективність S_e — це параметр, що показує швидкість передачі інформації, яку можна досягти при передаванні сигналів у смузі робочих частот каналу конкретної системи зв'язку. Вона є відносною мірою ефективності використання протоколом фізичного рівня обмеженого спектру частот

$$S_e = C/\Delta f . \quad (2.9)$$

Енергетична ефективність (потенційна завадостійкість) показує достовірність переданих даних при впливі на сигнал адитивного білого (гаусівського) шуму, за умови, що послідовність символів відновлена ідеальним демодулято-

ром. Ця величина визначається мінімальним співвідношення «сигнал / шум», яке необхідно для передачі даних через канал з імовірністю помилки, що не перевищує певне задане значення [18] та показує мінімальний рівень потужності передавача, необхідний для передачі сигналу без його спотворення. Таким чином характеристикою методу модуляції є залежність ймовірності помилки ідеального демодулятора від відношення «сигнал / шум».

Щоб зменшити електромагнітний вплив на приймальну систему з боку інших передавачів, що працюють в тому ж діапазоні, використовують технологію розширення спектру, *Spread Spectrum (SS)* [25]. На відміну від інших методів формування інформаційних сигналів, в яких більша частина енергії концентрується відносно навколо несного коливання, застосовується протилежний підхід — розподіл енергії інформаційного сигналу в відносно широкій смузі частот, так як відомо, що чим вище концентрація енергії сигналу для передачі окремої одиниці інформації, тим вище ефективність модуляції.

На рис.2.1 зображено спрощена блок схема модулю формування сигналу з технологією SS.

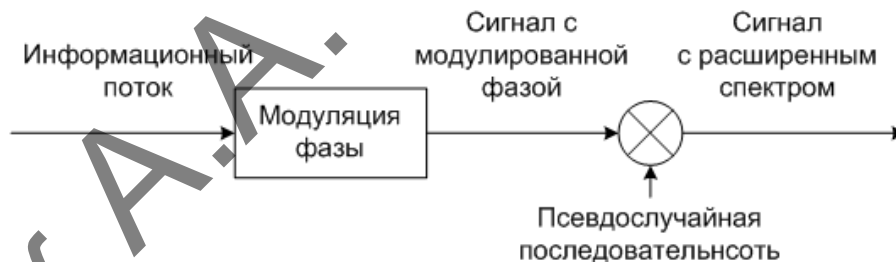


Рисунок 2.7 — Спрощена блок-схема передавача сигналу з технологією *Spread Spectrum (SS)*

Внаслідок подання сигналу в вигляді двійкових послідовностей з використанням декількох методів, смуга частот, яку займає інформаційний сигнал може бути значно розширена. В результати подібного розширення, спостерігаються такі ефекти:

1. розподіл енергії сигналу в межах відносно широкої смуги частот, що призводить до зниження спектральної щільності потужності в будь-якій точці спектру, як наслідок зменшується середній рівень спектральних складових;
2. можливість приймача розділяти інформаційний сигнал та певні завади, навіть якщо рівень такої завади значно вище за рівень сигналу.

На рисунку 2.8 зображено зміну форми сигналу при множенні його на шумовий сигнал. При передачі кожен біт замінюється псевдовипадковим двійковим кодом (псевдовипадковість потрібна для рівномірного розподілу потужності сигналу по діапазону частот).

Використання різних двійкових послідовностей дає можливість декільком *Spread Spectrum*-системам незалежно функціонувати усередині однієї і тієї ж смуги частот. При належному виборі параметрів системи модуляції, користувачі стандартних систем не будуть відчувати як значних перешкод від *Spread Spectrum*-систем, що працюють в тому ж частотному діапазоні, що збільшити кількість систем, а відповідно ефективно використовувати частотний ресурс. Проте слід враховувати, що кожен додатковий сигнал, стандартний або за технологією *Spread Spectrum*, буде підвищувати рівень завад для інших користувачів.

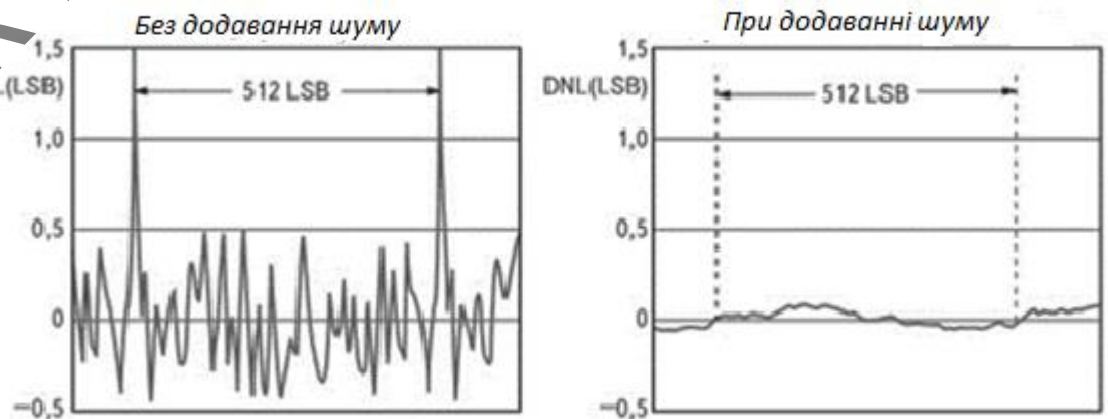


Рисунок 2.8 – Перетворення сигналу при додаванні шумоподібного коду

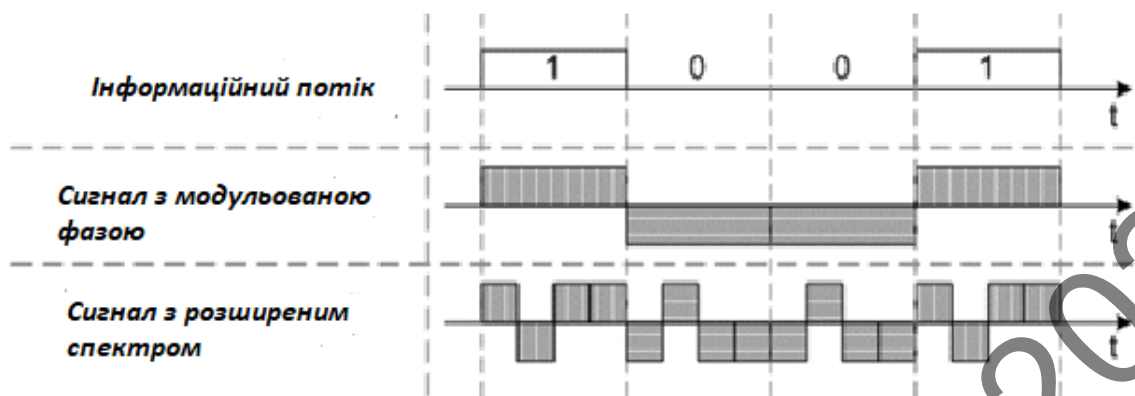


Рисунок 2.9 – Зміна цифрового сигналу після модуляції

Як видно з форми сигналу, наведеного на рисунку 2.8, він є шумоподібним. Тому доцільно розглядати радіометричні засоби для моніторингу інформаційних сигналів, сформованих за даною технологією.

У загальному випадку можна сказати, що виявлення *Spread Spectrum*-сигналу на певних відстанях можливо тільки в разі виконання таких умов:

- приймач має смугу пропускання, що відповідає смузі переданого сигналу;
- чутливість приймача, співвідношення «сигнал / шум» і посилення приймальної антени задовольняють вимогам для прийому на тій же дальності переданого сигналу, перетвореного за технологією *Spread Spectrum*;
- антена приймача має бути орієнтована строго у бік джерела сигналу;
- передавальна антена, якщо вона спрямована, має бути спрямована у бік приймача, тобто передавач треба орієнтувати в тому ж напрямку, що й приймач.
- демодулятор приймача має бути призначеним для того ж виду модуляції, який використовується на передавальній стороні;
- PN-код приймача і передавача повинні відповідати один одному [24, 25].

Відносна щільність сигналів в каналі зв'язку вимагає освоєння нових діапазонів, зокрема міліметрового. Проте, сильне загасання радіохвиль у міліметро-

вому діапазоні потребує підвищення потужності передавачів, що є недоцільним як з технічної, так економічної точок зору. Тому постає питання розробки перспективних технологій передачі сигналів та контролю їх параметрів, зокрема, впровадження нових методів модуляції та принципів просторової селекції. Наприклад, для досягнення цілей, зазначених у стандартах 5G, потрібні нові технології як на фізичному, так і на рівні MAC (Media Access Control). Розробником цих стандартів 3GPP визначено три ключові сфери їх застосування (на рис. 2.10) [26].



Рисунок 2.10 — Основні напрямки розвитку 5G

Сфера застосування нового покоління зв'язку 5G охоплює також і мобільний широкополосний зв'язок [17, 27].

У верхній частині рисунка показано, що мобільний широкополосний зв'язок (Enhanced Mobile Broadband) фокусується на розширенні функцій призначеного для користувача інтерфейсу. Зокрема, передбачається збільшення трафіку в 10000 раз, досягнення швидкості 100 Мбіт/с, а також забезпечення гігабітних швидкостей для спеціальних програмних застосувань.

Розвиток міжмашинного зв'язку (Machine-to-Machine) також ґрунтується на використанні радіоканалів для взаємодії суб'єктів однієї мережі, а також з різних мереж. Передбачається при цьому, що технічні засоби не потребують обслуговування, якщо функціонують в автономному режимі. Такими засобами мо-

жуть бути: різноманітні давачі, камери відеоспостереження, пристрої, що здійснюють збір інформації, а також дистанційне взаємне керування.

Дистанційна система моніторингу або керування наземним та повітряним транспортом може використовуватись, наприклад, міжнародною системою GMDSS (Global Maritime Distress and Safety System), до складу якої входять сучасні наземні, супутникові та судові системи радіозв'язку, що потребує використання 5G для удосконалення способів зв'язку.

Для реалізації зв'язку у вище описаних сфер застосування розвитку його можливостей, запропоновано використовувати новий метод передачі даних через канал зв'язку п'ятого покоління — SEFDM (Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing). Головною перевагою SEFDM, є його відносно висока спектральна ефективність, яка досягається через застосування неортогональних сигналів. Спектральна ефективність SEFDM-сигналу може бути в 2–3 рази більша у порівнянні з сигналами, притаманних попереднім системам бездротового зв'язку [27]. Спосіб SEFDM модуляції забезпечує високу стійкість перед завадами, властиву OFDM-сигналам. SEFDM-символ можна записати таким чином

$$S_A^n = \sum_{K=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} C_N^n e^{2j\pi K \Delta f t}, \quad (2.10)$$

де, N — кількість піднесних, n — номер SEFDM символу, k — модулюючий символ k -тої піднесної n -го FDM символу, Δf — проміжок між сусідніми частотами.

Головною характеристикою даного типу модуляції є коефіцієнт частотно-го ущільнення α піднесних частот, який виражається як добуток тривалості SEFDM символу T на Δf :

$$\alpha = \Delta f t.$$

По значенню даної характеристики можна судити про спектральну ефективність використовуваного методу. У разі OFDM α дорівнює 1, для методу

SEFDM $\alpha < 1$. Спектральна ефективність досягається завдяки тому, що піднесні не є ортогональними, таким чином різниця між піднесними частотами може бути меншою, ніж $1/T$. Як наслідок, відбувається перекриття піднесних. Авторами [27] експериментально досліджено спектр сигналів з SEFDM модуляцією в E-діпазоні (71 – 76 і 81 – 86 ГГц) і було показано збільшення спектральної ефективності на 50% у порівнянні з OFDM.

Формування SEFDM-сигналу здійснюється аналогічно формуванню OFDM-сигналу. Як і раніше, вводиться захисний інтервал, для зменшення міжсимвольної інтерференції. У всіх алгоритмах формування SEFDM-сигналів використовується зворотне дискретне перетворення Фур'є. Різниця даних алгоритмів полягає в відмінній обчислювальній складності і технічній реалізації даних методів на практиці. Рисунок 2.5 показує спрощену схему модуляції SEFDM.

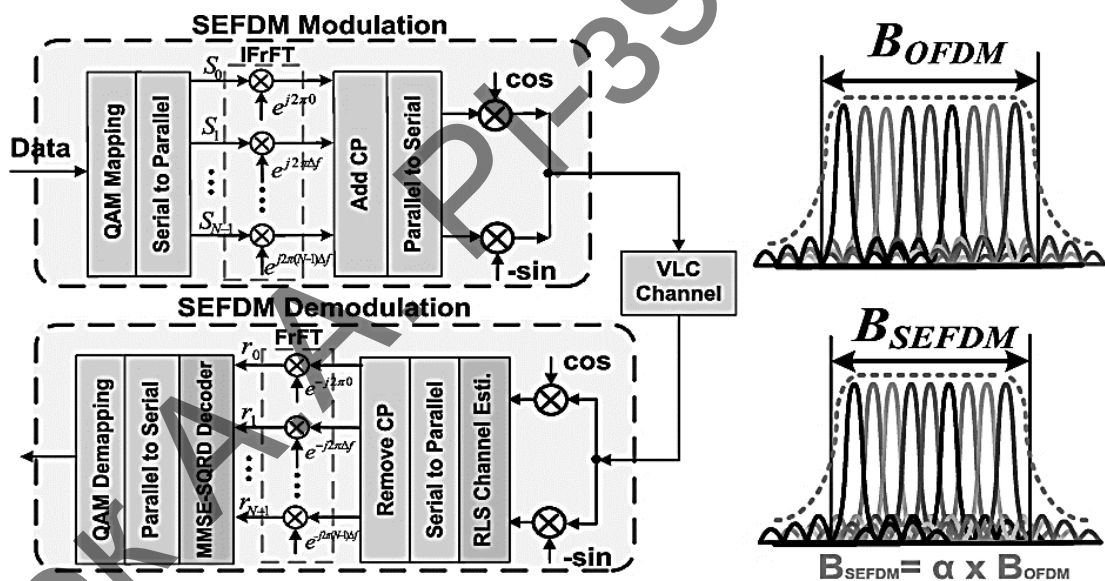


Рисунок 2.11 — Блок-схема формування SEFDM сигналу

На передавачі вихідна послідовність бітів спочатку відображається в символах QAM. Потім до символів QAM для модуляції SEFDM застосовується зворотне перетворення Фур'є [27]. Неортогональний сигнал SEFDM описується (2.10). Структурно приймач SEFDM сигналу побудований подібно передавачу, але у зворотному напрямку.

На рис. 2.12 приведено зображення спектрів сигналів з OFDMA- та SEFDMA-модуляцією, які отримано у дослідженні [28]. З рисунку видно, що в спектрі сигналу наявні відносно невеликі флуктуації в основній смузі частот та різкий спад потужності за межами смуги пропускання. Проте швидкість спадання спектру слабка, що є наслідком прямокутної форми обвідної, яка найгірша з точки зору спаду позасмугового випромінювання.

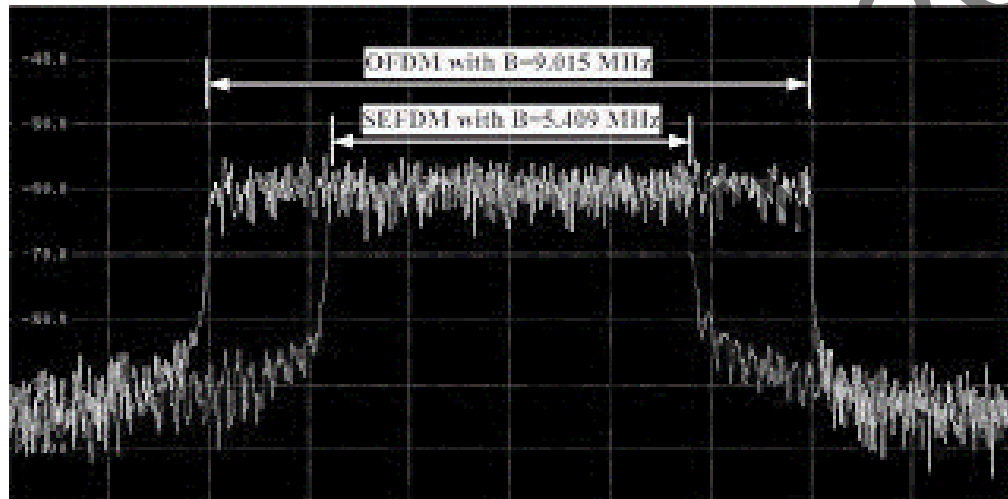


Рисунок 2.12 — Експериментальне порівняння смуги пропускання SEFDM ($\alpha = 0,8$) та OFDM

Рівень позасмугового випромінювання (завад для інших абонентів) складає близько мінус 45 дБ для зміни частоти на величину, рівну ширині основної смуги частот. Проте для набагато більшої кількості піднесних сумарний рівень позасмугового випромінювання може мати достатньо відносно велику величину, яку треба враховувати під час визначення характеристик радіоканалу [29].

Для передачі однакової кількості даних, для SEFDM смуга пропускання дорівнює 5,409 МГц, а для OFDM — 9,015 МГц. Несна частота становить 2 ГГц [28]. Отже, аналізуючи методи передачі даних через радіоканал мм-діапазону, можна зробити висновки, що сигнали в радіоканалі є шумоподібними та мають низьку інтенсивність, а у разі використанні спільного каналу зв'язку сигнали одного з абонентів стають завадою для інших, що може впливати про несанкціонований доступ до даного каналу.

Оскільки сигнали з вище описаними типами модуляції за структурою спектра схожі на шумові, доцільно використовувати радіометричні методи та засоби для проведення радіомоніторингу каналів зв'язку в мм-діапазоні. Причому, враховуючи особливості енергетичних та спектральних характеристик інформаційних сигналів, які передбачається аналізувати під час радіомоніторингу, особливу увагу слід приділити метрологічним характеристикам низькочастотного блоку радіометричної системи.

2.4 Оцінка рівню сигналу закладного пристрою

Основний тип сигналу у мережах радіозв'язку, що створюється радіозакладними пристроями можна віднести до зовнішньої групової завади. Під радіозакладним пристроєм розуміють такий пристрій, що може передавати сигнал аналогічного походження, проте створений іншими системами радіозв'язку, що працюють в тому ж частотному діапазоні. У традиційному для закладних пристроїв діапазоні (0,3–3 ГГц) таку заваду можуть створювати радіомікрофони, телефонні радіоретранслятори, приховані відеокамери з передачею інформації через радіоканал та інші пристрої для несанкціонованої передачі приватної інформації.

Для обчислення рівню сигналу РЗП формул у загальному випадку не існує через складність самого сигналу при передачі та наявність багатьох систем радіозв'язку. Але на сьогодні вже є певні відомості щодо видів модуляції та систем передачі інформації за технологією 5G, тому можливо провести аналіз можливості реєстрації монохроматичних та шумоподібних сигналів [15].

Враховуючи особливості побудови РЗП для діапазону 0,3 – 3 ГГц та спектральні характеристики їх інформаційних сигналів, аналогічну ситуацію можна очікувати і для систем зв'язку міліметрового діапазону.

При проведенні радіомоніторингу можлива реєстрація сигналів з різним спектром, починаючи від вузькосмугового сигналу, що характерно для більшості РЗП, до надширокосмугового (шумоподібного) сигналу сучасних пристроїв пе-

редачі інформації. Тому доцільно розглянути перетворення гармонійного та шумового сигналів, яке здійснюється при проходженні таких сигналів через тракт радіометричної системи.

Вимірювання параметрів сигналів малої потужності у мікрохвильовому діапазоні, як правило, проводиться за допомогою методу заміщення із застосуванням радіометричної системи модуляційного типу. На рис. 2.13 приведена функціональна схема такої РС для мм-діапазону довжин хвиль. Дана система використовувалась автором для проведення експериментальних досліджень. Рівень потужності вимірювального сигналу P_C порівнюється з рівнем вихідної потужності стандартного (вимірювального) генератора P_K , ослабленим до необхідного значення зразковим атенюатором (AI). Порівняння значень P_C та P_K реалізується за допомогою вольтметра на виході РС після послідовного модуляційного та гетеродинного перетворення вхідних НВЧ-сигналів і переносу енергетичних співвідношень в область низьких частот. У зв'язку з тим, що процедури визначення рівнів потужності гармонічних та шумових сигналів дещо відрізняються між собою, розглянемо порядок виконання вимірювання кожного сигналу окремо.

2.3.1 Метод визначення рівню потужності гармонічного сигналу

Джерело гармонічного сигналу X з'єднують зі входом РС (рис. 2.13). Причому у випадку достатньої вихідної потужності джерела X , її попередньо можна виміряти стандартними засобами (наприклад, вимірювачем потужності), і за допомогою атенюатора встановити певний рівень сигналу на вході РС. Даній потужності відповідає змінна напруга

$$U_C(t) = U_C \sin \omega_C t \quad (2.11)$$

Форма сигналу, що подається на НЗВЧ вхід комутаційного модулятора UI , зображена на епюрі рис. 2.14 *а*. На вхід керування НВЧ модулятора надходить напруга комутації, яке має вигляд (рис. 2.14 *б*). В результаті на виході модулятора отримаємо напругу (рис 2.14 *в*).

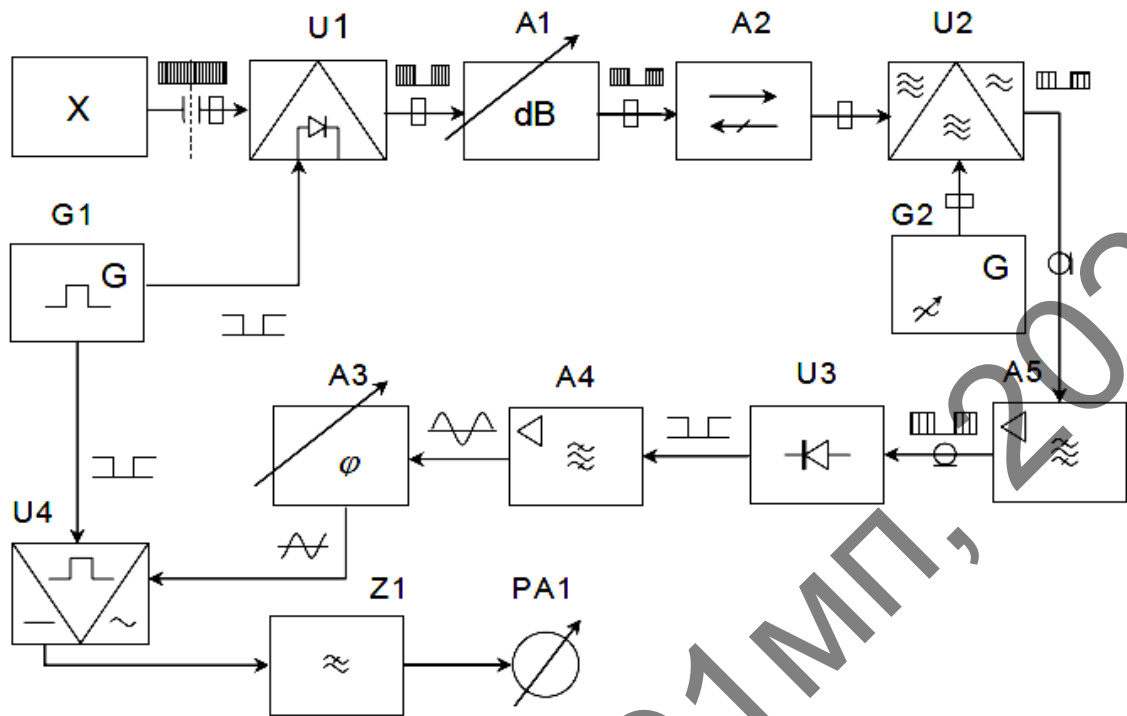


Рисунок 2.13 — Функціональна схема високочутливої радіометричної системи мм-діапазону [26]:

$U1$ — 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;

$A4$ — біквдратний смуговий фільтр; $A5$ — підсилювач проміжної частоти;

$U4$ — синхронний детектор; $Z1$ — фільтр низьких частот;

$PA1$ — вольтметр; X — джерело сигналу

З виходу модулятора ($U1$) сигнал через атенюатор ($A1$) і вентиль ($A2$) надходить на вхід перетворювача частоти ($U2$), який виконаний за балансною схемою. На другий вхід перетворювача надходить сигнал гетеродину ($G4$). На виході змішувача формується напруга ПЧ (рис. 2.14 з), яка після підсилювання ППЧ ($A3$) поступає на квадратичний детектор ($U3$). З квадратичного детектора сигнал (рис 2.14 д) подається через біквдратний смуговий фільтр ($A4$) до входу синх-

ронного детектора (U_4), у якому проводиться остаточна демодуляція сигналу шляхом перемноження вхідного сигналу на опорний сигнал (див. рис.2.14 *e*).

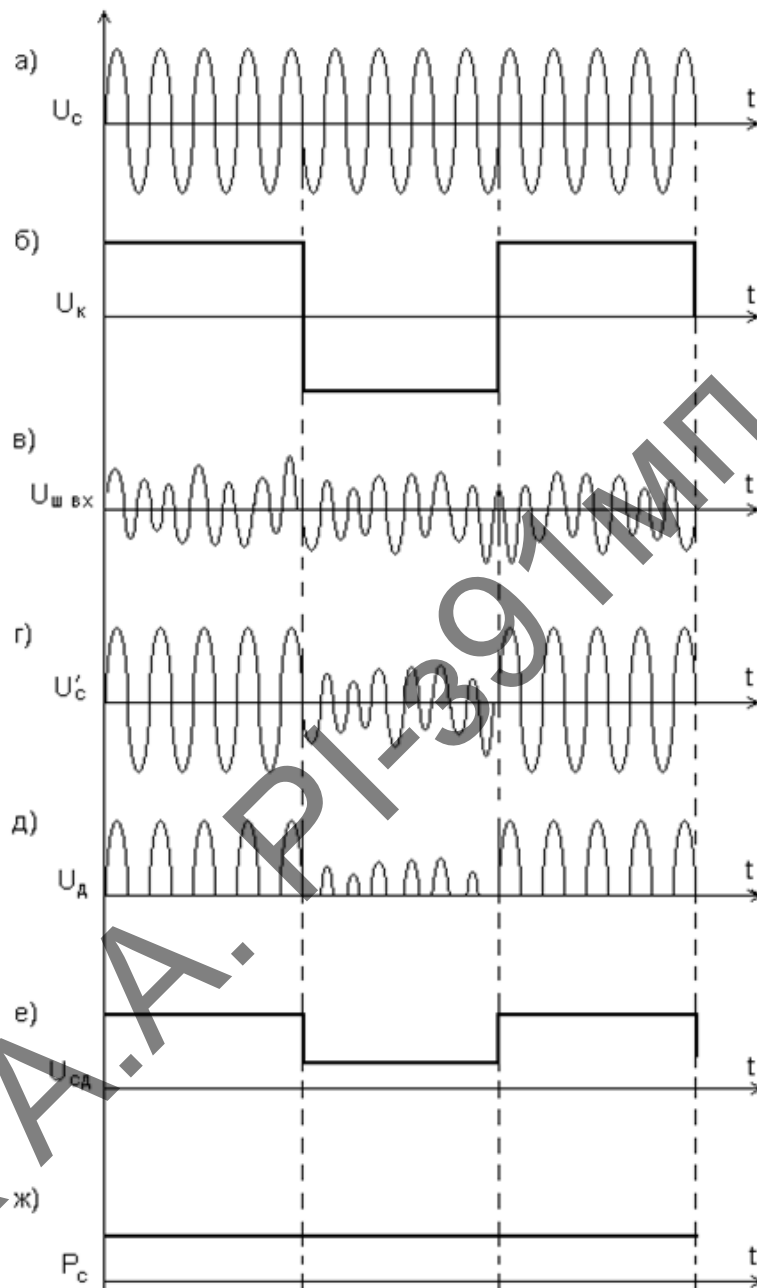


Рисунок 2.14 — Форми сигналів при перетворенні гармонійних сигналів в тракці радіометричної системи

Фільтром нижніх частот (Z_1) виділяється постійна складова напруги, яка пропорційна потужності сигналу (рис 2.14 *ж*).

Для визначення рівня вимірюваної потужності джерело сигналу відключають від установки. На виході вимірювального генератора, який підключається до входу РС, на частоті сигналу встановлюють рівень потужності який можна виміряти стандартним приладом, наприклад, МЗ-22А. Якщо потрібно вводити ослаблення сигналу, що вимірюється, то його потужності визначається за формулою

$$P_C = \frac{P_K}{10^{0,1(A_K - A_C)}}, \quad (2.12)$$

де A_C, A_K — ослаблення потужності відповідно P_C та P_K , атенуатором (АТ).

2.3.2 Вимірювання потужності шумових сигналів.

Вимірювання потужності шумових сигналів проводять аналогічно тому, як проводиться вимірювання монохроматичних сигналів (рис.2.15).

При вимірюванні потужності шумових сигналів визначають спектральну щільність потужності шуму (СЩПШ) на окремих частотах робочого діапазону НЗВЧ модуля. Інтегральну потужність шумового сигналу отримують розрахунковим методом за формулою

$$P_{ш} = \frac{\sum_{i=1}^N СЩПШ_i(f)}{N} \Delta f, \quad (2.13)$$

де $СЩПШ_i(f)$ — спектральна щільність потужності шуму на i -й;

$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ — смуга робочих частот вхідного НВЧ сигналу;

N — кількість точок виміру у смузі робочих частот.

СЩПШ вимірюють методом заміщення з використанням зразкового атенуатора та зразкового калібрувального генератора. Алгоритм вимірювання СЩПШ також реалізується в два етапи, як при вимірюванні потужності монохроматичного сигналу. Калібрувальним генератором у такому випадку є зразковий генератор електромагнітного шуму у заданому діапазоні частот.

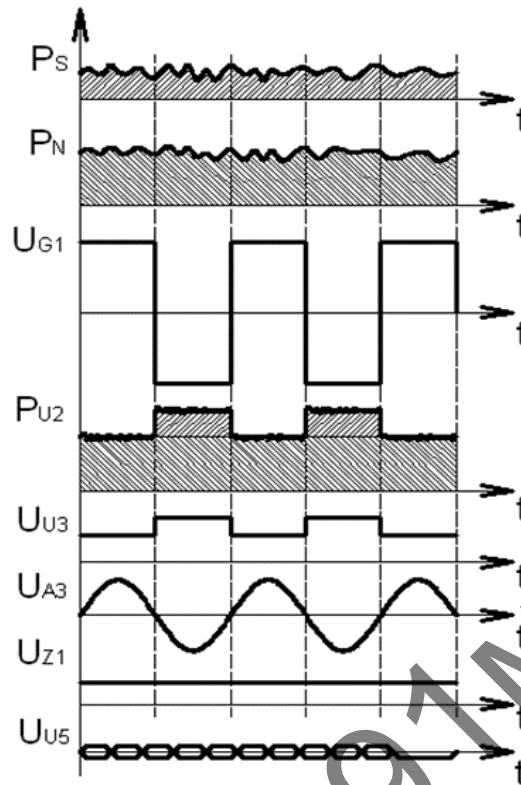


Рисунок 2.15 — Форми сигналів при перетворенні шумових сигналів в тракті радіометричної системи

Інтегральна потужність джерела сигналу визначається за формулою (2.13). Для цього необхідно провести вимірювання в N точках діапазону робочих частот. Кількість точок вимірювання визначається виразом

$$N = \frac{\Delta f}{\Delta F} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\Delta F}, \quad (2.14)$$

де $\Delta f = (f_{\max} - f_{\min})$ — смуга робочих частот джерела шумового сигналу;

ΔF — ефективна загальна смуга пропускання ППЧ.

2.4 Основні принципи та технічна реалізація розробленого методу

Сигнал, що створюється закладним пристроєм, може бути як монохроматичним, так і шумоподібним. Проте, як показано вище, він може реєструватись

за допомогою радіометричної системи. Крім того, запропонований метод може використовуватись також для визначення певних характеристик каналу зв'язку.

Однією з основних характеристик є швидкість передачі даних (1.7), а також пов'язана з нею енергетична ефективність (2.9). Отже обидві величини залежать від співвідношення рівнів потужності сигналу та шуму (P_S/P_N). Причому до P_N слід відносити не тільки тепловий (гаусовий) шум, а також завади, які створюються сторонніми передавачами, що входять до радіомережі, а також закладними радіопристроями. Однією із задач радіомоніторингу є оцінка стану каналу зв'язку з точки зору забезпечення цілісності інформації, що передається та безпосередньо залежить від пропускної здатності каналу, тобто від співвідношення (P_S/P_N). Вимірювання цієї величини стандартними методами потребує використання спеціалізованої апаратури та високої кваліфікації технічного персоналу. Крім того, цей процес займає значний час та вимагає великих обчислювальних ресурсів.

Тому для проведення радіомоніторингу каналу зв'язку у мм-діапазоні доцільно застосовувати приймальну систему радіометричного типу як засіб визначення величини P_S/P_N , а також інших параметрів сигналів з шумоподібним спектром широкосмугових.

Через відносно низький поріг чутливості, достатньо високу точність вимірювань, простоту в використанні та конструкції найбільш перспективною є модуляційна схема побудови приймальної системи для радіомоніторингу. Для проведення експериментальних досліджень за темою даної дисертації було використано РС мм-діапазону, що розроблена лабораторією мікрохвильової радіометрії. Робочий діапазон частот даної системи складає 37,5–54 ГГц, а функціональна схема приведена на рис. 2.9. Дана РС дозволяє реєструвати слабкі ($P \leq 10^{-6}$ Вт) та дуже слабкі ($P \leq 10^{-14}$ Вт) сигнали і, таким чином, визначати рівень шумів та пропускну здатність каналів зв'язку мм-діапазону. Оскільки за існуючими стандартами стільникового зв'язку IEEE 802.11 (a, b, g, n), рівень потужності інформаційних сигналів, як правило, лежить у межах мінус (110 – 75) дБм, можна вважа-

ти, що такої чутливості РС достатньо для вимірювання рівня потужності сигналів і завад з відносною похибкою до 10%, що зазначено в атестаті на систему.

Для уточнення можливостей запропонованого методу слід розглянути більш детально принцип дії системи (рис. 2.8).

Досліджуваний сигнал, що імітує реальне випромінювання РЗП, сигнал або заваду у каналі зв'язку, випромінюється еталонним генератором сигналів, що працює в робочій смузі частот радіометра.

Приймальна система працює за таким принципом. На один зі входів модулятора $U1$ приходять досліджуваний сигнал, на інший його вхід надходить сигнал в вигляді прямокутних імпульсів від гетеродина. Таким чином сигнал на виході модулятора має амплітудну модуляцію. Зміна форми сигналу в тракці радіометра зображено на рис. 2.10. Далі сигнал поступає на вхід прецизійного атенюатора, де він ослабляється до відповідного рівня. Основним параметром, що визначає ефективність роботи системи в цілому, є вибір частоти модуляції. Частота модулятора вибирається такою, щоб за один період комутації коефіцієнт передачі радіометричного тракту не міг значно змінитися.

Оптимальною є частота 1 кГц (див. наприклад [1, 2, 15, 16]). Співвідношення потужності прийнятого та еталонного сигналу визначає глибину модуляції.

Як описано в [15, 22] даний тип низькочастотної модуляції зберігається і після квадратичного детектування.

З виходу атенюатора $A1$ модульований сигнал в вигляді прямокутних імпульсів 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. На виході перетворювача отримуємо сигнал проміжної частоти, що підсилюється в блоці $A5$. Надалі сигнал проходить через детектор $U3$, на виході якого маємо напругу з частотою модуляції 1 кГц. Далі сигнал в вигляді прямокутних імпульсів на частоті 1 кГц проходить через блок біквадратного фільтру $A4$ та потрапляє на фазообертач $A3$, що в загальному випадку може бути виконаний на одній друкованій платі з СД

[30], після чого сигнал з регульованою фазою подається на один із входів синхронного детектора $U4$ на інший вхід якого подається сигнал від генератора. Такий генератор реалізовано на мікросхемі Ne555. Вихідна напруга $U4$ пропорційна різниці потужностей сигналів, один з яких складається з досліджуваного сигналу та власних шумів системи, а другий — власні шуми РС. Величини потужностей зазначених сигналів залежать від смуги робочих частот тракту проміжної частоти ΔF . Як інтегратор використовується ФНЧ (Z1), що визначає смугу пропускання низькочастотного блоку РС. Напруга вихідного сигналу РС є постійною, а її величина пропорційна потужності вхідного сигналу і визначається за допомогою вольтметра PA1.

Поріг чутливості описаної РС визначається за формулою

$$\Delta P_{KP} = 2\sqrt{2}P_N \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \quad (2.15)$$

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

Проведений аналіз метрологічних характеристик даної РС підтверджує можливість застосування радіометричного методу для проведення радіомоніторингу. Зокрема, він може використовуватись для визначення рівню сигналу, що передається радіозакладним пристроєм. 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 % [4].

2.5 Вдосконалення низькочастотного тракту РС

Як показали проведені в роботі дослідження, метрологічні характеристики радіометричної системи значною мірою залежать від параметрів пристроїв низькочастотного тракту. Зокрема, поріг чутливості РС залежить від рівня низькочастотних шумів та коефіцієнта перетворення синхронного детектора. Тому

особливу увагу при проектуванні РС слід приділяти, зокрема, вдосконаленню цього пристрою низькочастотного блоку.

Синхронний детектор (СД) відіграє роль другого перетворювача під час обробки вимірюваних шумоподібних та монохроматичних сигналів. Як доведено автором [30] (див. додаток 1) вдосконалення СД шляхом доповнення його фазообертачем дозволяє зменшити поріг чутливості системи на 10–20%.

Для проведення даного дослідження використовувалась діюча радіометрична система та еталонний генератор шумових сигналів. Сигнал від такого генератора подавався на вхід РС, шляхом зміни опорного резистора R1 змінювалось значення фази опорного сигналу в синхронному детекторі (див. додаток 1 та [15]).

Результати досліджень приведені на рис. 2.16, на якому представлена залежність середнього значення вихідної напруги СД від зсуву фази вхідного сигналу відносно опорного.

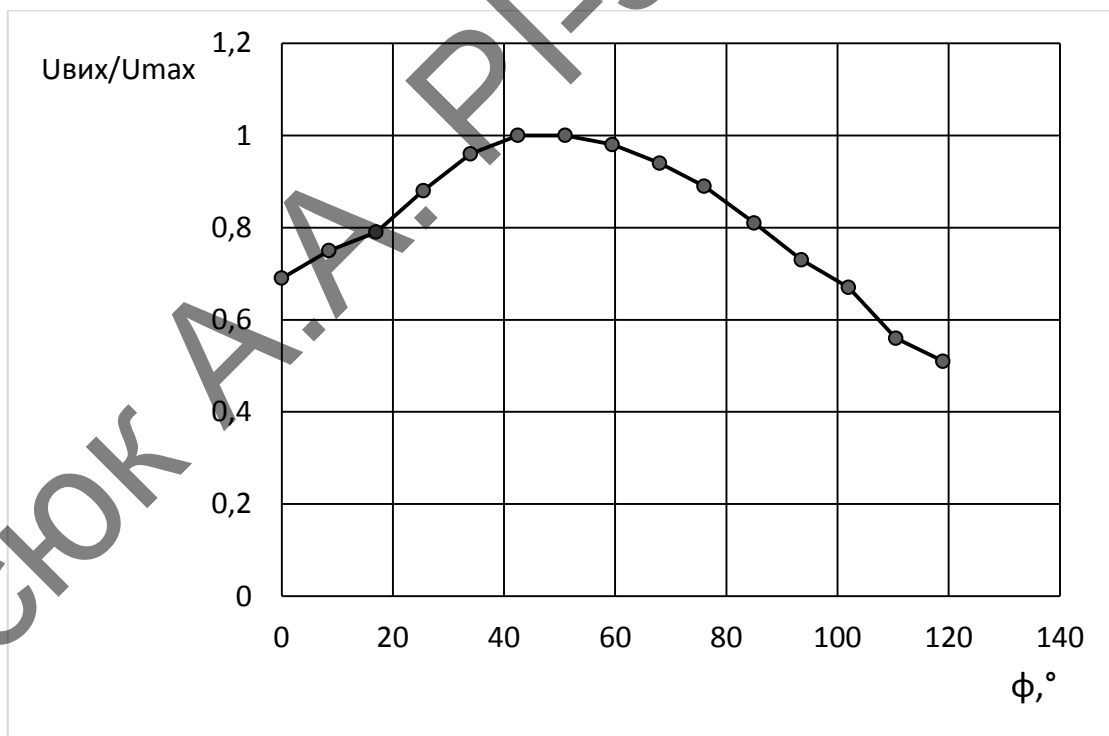


Рисунок 2.16 – Залежність середнього значення вихідної напруги СД від фази опорного сигналу

Збільшення вихідної напруги при зміні фази в 45 градусів, свідчить про те, що при проходженні по тракту радіометра фаза сигналу зміщується на 45 градусів. Формульно це описується наступним чином:

$$i(t) = a_2 E_r \cos(\theta_1 - \theta_2) E_s(t),$$

де θ_1, θ_2 — фази коливань досліджуваного та опорного сигналів. Як видно з формули, при $\theta_1 - \theta_2 = 0$ значення струму $i(t)$ набуває максимально значення.

Зміна кліматичних умов під час використання радіометра також може призвести до неконтрольованої зміни фази обвідної сигналу, що вимірюється. Крім того, слід враховувати зміну фази обвідної, під час перетворення сигналу в радіометричному тракту РС. З рис. 2.16 видно, що оптимальний зсув фаз між опорним та обвідної вимірювального сигналу на входах СД складає приблизно 50° . При збільшенні даної величини, наприклад, до 120° рівень вихідного сигналу СД зменшується в 2 рази. Оскільки збіг фаз зазначених вхідних сигналів СД підвищує чутливість радіометричної системи в цілому, то, на думку автора, є доцільним використання пристрою регулювання фази опорного сигналу СД. Схематичне рішення описано в [30].

Висновки до розділу 2

З огляду на результати проведеного аналізу спектральних характеристик інформаційних сигналів та завад, що притаманні сучасним телекомунікаційним системам, зокрема мережам стільникового зв'язку, запропоновано метод і засіб для радіомоніторингу каналу зв'язку систем такого типу.

Враховуючи рівень сигналів в радіомережах та їх випадковий розподіл їх потужності у виділеному частотному діапазоні, як засіб для проведення радіомоніторингу запропоновано приймальну систему радіометричного типу. На відміну від відомого стандартного обладнання, яке використовується для оцінки стану радіоканалів, вона має поріг чутливості з потужності в 10-100 разів менший. Це дозволяє більш точно визначати рівень шумів у радіоканалі, його пропускну здатність та енергетичну ефективність. Крім того, запропонована система має меншу ціну, а метод вимірювань потребує менше часових та апаратних ресурсів.

З огляду на тенденції розвитку стільникового зв'язку, а також інших радіосистем передачі інформації, а саме, наміром використовувати частоти міліметрового діапазону, запропоновано з метою захисту інформації для проведення радіомоніторингу каналів зв'язку в таких радіомережах, застосовувати приймальні системи радіометричного типу.

Проведено вдосконалення синхронного детектора низькочастотного блоку функціонуючої радіометричної системи, що дозволило, зменшити її поріг чутливості на 10-20%.

Фесюк А.А. РІ-391 МП, 2020

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЙМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РАДІОМОНІТОРИНГУ

Якість радіомоніторингу в значній мірі залежить від характеристик приймальної системи, що застосовується. Основними з них є амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) та поріг чутливості РС, оскільки вони, у першу чергу, впливають на точність визначення рівню шумів, пропускну здатності та енергетичної ефективності каналу зв'язку. В процесі виконання роботи були досліджені АЧХ, частотна залежність порогу чутливості та передаточна характеристика функціонуючої радіометричної системи модуляційного типу мм-діапазону.

На рис. 3.1 наведена спрощена схема, що застосовувалась при вимірюванні вказаних характеристик.

3.1. Дослідження метрологічних характеристик системи

Для доведення можливості застосування РС як засобу технічного захисту інформації в телекомунікаційних системах мм-діапазону, зокрема у мережах стільникового зв'язку покоління 5G, стандарти якого передбачають канали у мм-діапазоні, необхідно дослідити метрологічні характеристики РС і спроможність такої системи визначати енергетичні параметри інформаційних сигналів, характерних для зазначених систем зв'язку.

Для дослідження форми АЧХ і визначення робочої смуги частот РС був використаний метод прямих вимірювань. Досліджуваний сигнал подавався від генератора електромагнітного шуму (ГЕШ), який має практично постійну потужність вихідного сигналу в діапазоні частот 37–53 ГГц. Під час вимірювань рівень сигналу регулювався прецизійним атенюатором (A) поляризаційного типу. Зміна частоти, на якій вимірювалась потужність сигналу, здійснювалась перебудовуванням гетеродину (G_2 , рис 2.13). Абсолютна похибка частоти фактично дорівнювалась робочій смузі частот тракту ПЧ і не перевищувала 0,2 ГГц.

Результат вимірювань показано на рис. 3.2, де представлена АЧХ (залежність коефіцієнта передачі радіометричного тракту від частоти для номінального значення потужності вимірюваного сигналу). На даному графіку напруга індикатора U на виході ФНЧ $Z1$ (рис. 2.13) пропорційна потужності вимірюваного сигналу.

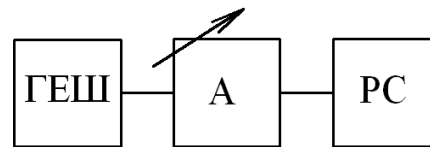


Рисунок 3.1 — Спрощена блок-схема стенду для вимірювання характеристик РС

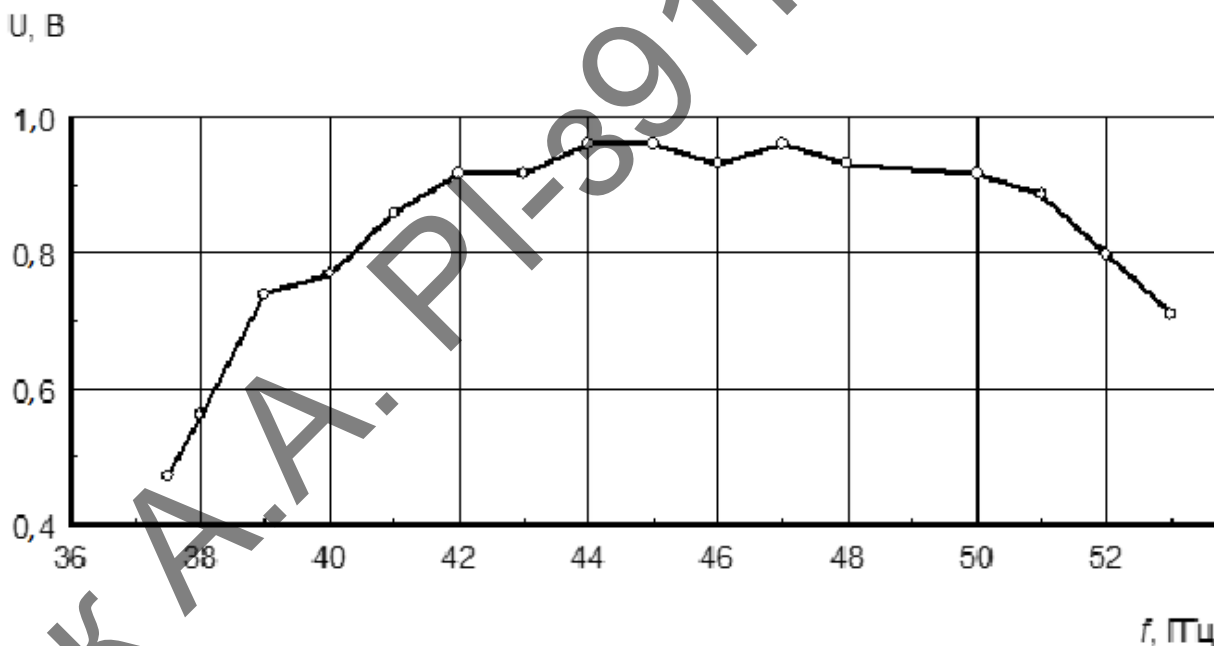


Рисунок 3.2 — Амплітудно-частотна характеристика РС

Отримана характеристика свідчить про широку смугу робочих частот системи і підтверджує можливість застосування даної РС для проведення радіомоніторингу каналу зв'язку у діапазоні 38 – 52 ГГц.

Для оцінки рівню шуму та завад радіоканалу, а також його пропускної здатності потрібно визначити поріг чутливості розробленої системи. Для цього використовувався той же самий вимірювальний стенд (рис. 3.1). Регулюючи рівень

ослаблення атенюатора (А) можна було змінювати рівень сигналу, що надходить до входу радіометра. Типові залежності напруги U вихідного вольтметра $PA1$ (рис. 2.13) від рівня вхідного сигналу, тобто передаточна характеристика радіометричного тракту для трьох частот наведені на рис. 3.3 – 3.5.

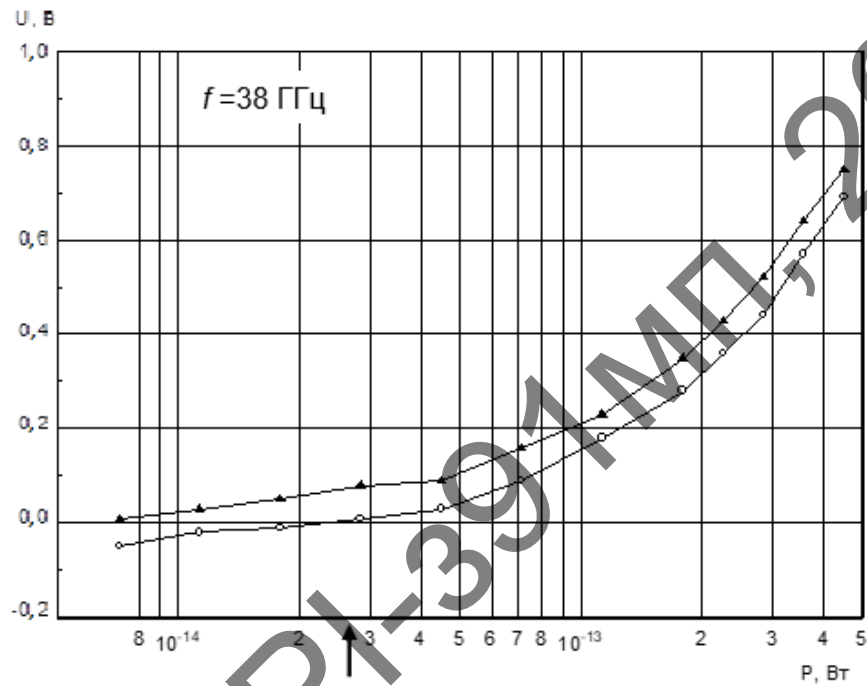


Рисунок 3.3 — Передаточна характеристика РС для частоти 38 ГГц

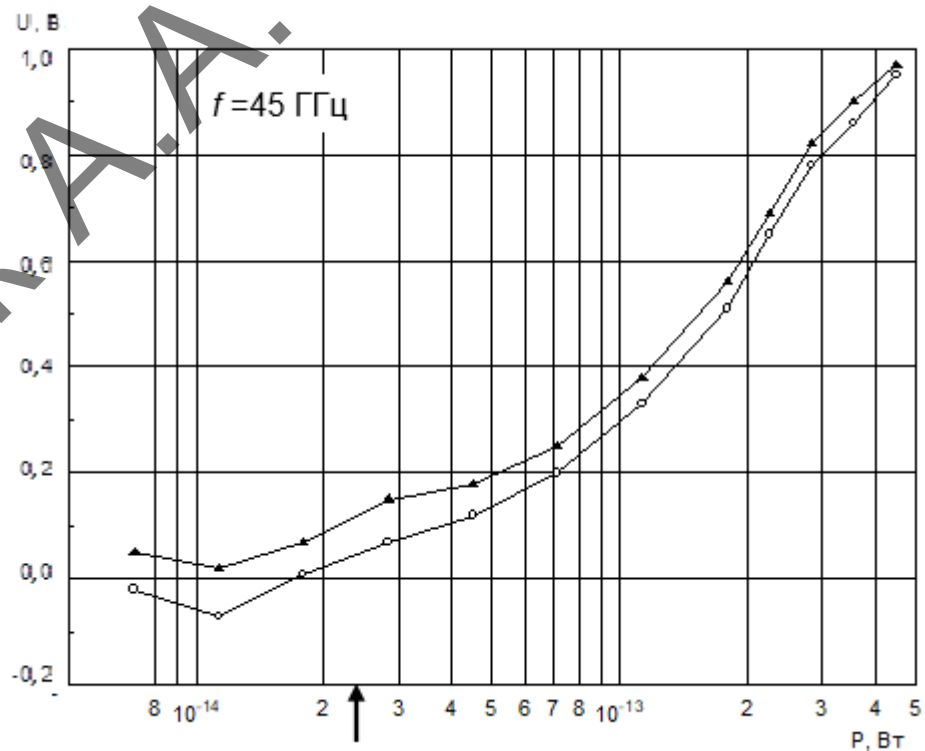


Рисунок 3.4 — Передаточна характеристика РС для частоти 45 ГГц

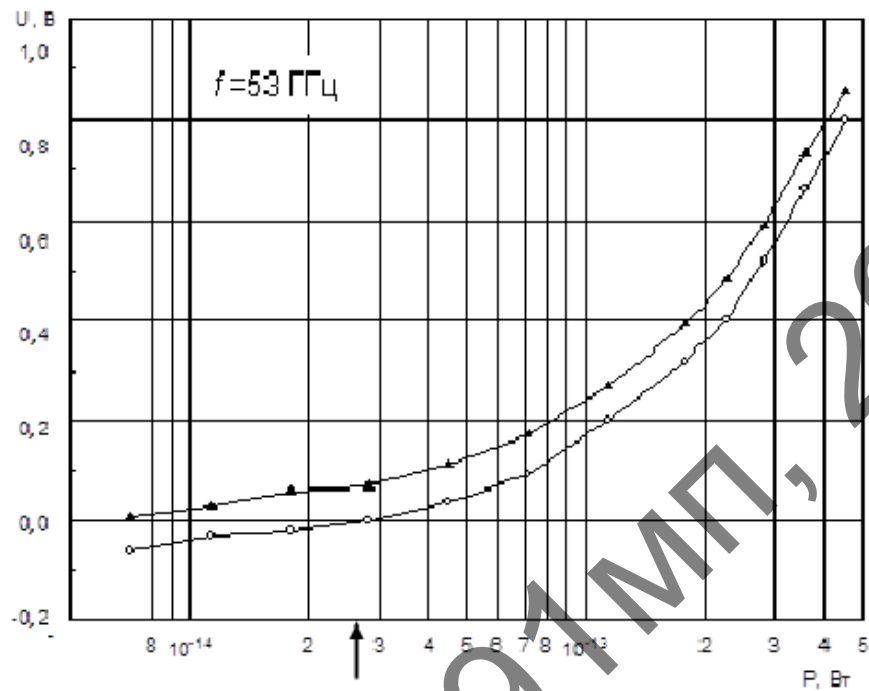


Рисунок 3.5 — Передаточна характеристика РС для частоти 53 ГГц

Для зручності визначення порогу чутливості характеристики побудовані в логарифмічному масштабі. Стрілками на рисунках позначені величини порогу чутливості для різних частот ($P_s/P_N=1$). У процесі вимірювання спостерігався розкид значень U , пов'язаний з характерними для радіометричних систем низькочастотними флуктуаціями вихідного сигналу. На рис. 3.3 – 3.5 лінії з маркерами (▲) відповідають верхній межі розкиду, а з маркерами (●) — нижній.

На рис. 3.6 показана частотна залежність порогу чутливості системи. Лінія P_N відповідає нижній границі гарантованої реєстрації зовнішніх сигналів. З рисунку видно, що за допомогою радіометричної системи можна надійно вимірювати сигнали потужністю від $3 \cdot 10^{-14}$ Вт і більше (для смуги тракту проміжної частоти системи 200 МГц). Більш потужні сигнали також можуть реєструватися даною системою, проте для цього потрібно вводити початкове ослаблення сигналу за допомогою атенюатора ($A1$, рис. 3.1). Таким чином РС може використовуватися як приймач для проведення радіомоніторингу каналу зв'язку телекомуніка-

ційних мереж мм-діапазону, зокрема, радіомережі стільникового зв'язку покоління 5G.

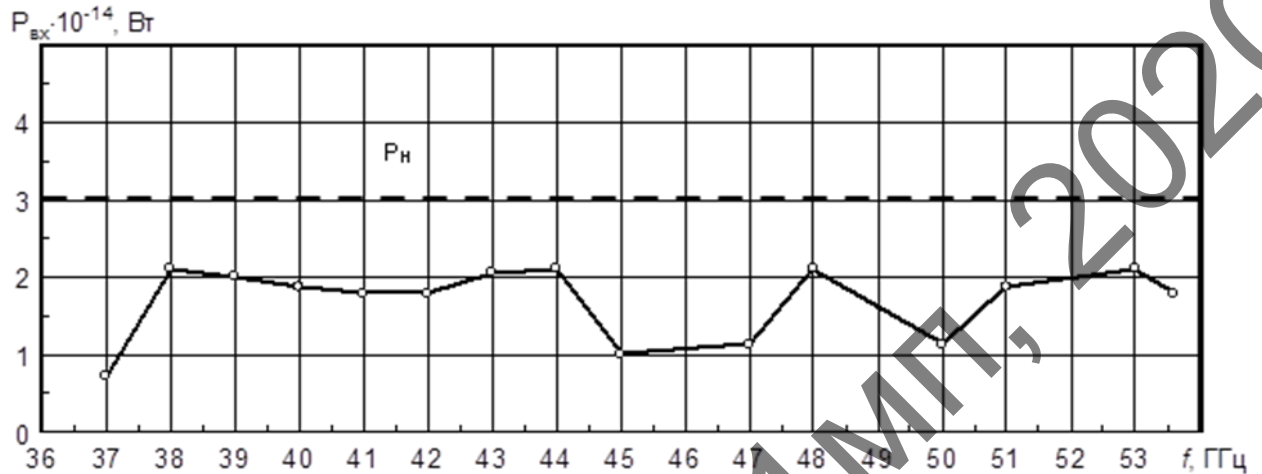


Рисунок 3.6 — Частотна залежність порога чутливості РС

Недоліками даної системи є наявність власних НЧ шумів, що приводять до виникнення випадкової складової похибки вимірювання. Для усунення цього недоліку потрібно збільшити кількість спостережень у кожній частотній точці та використовувати комп'ютерну обробку результатів вимірювань.

3.2. Реєстрація сигналів малої потужності за допомогою РС

Для перевірки можливостей системи щодо реєстрації слабких сигналів з різним частотним спектром в частотному діапазоні 37 – 53 ГГц були проведені її лабораторні дослідження. Структурна схема вимірювань наведена на рис. 3.7.

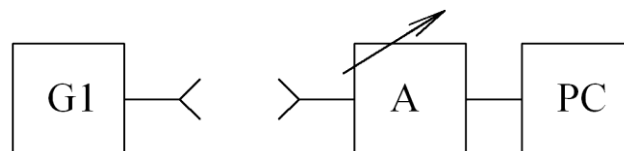


Рисунок 3.7 — Структурна схема стану для проведення радіомоніторингу

За допомогою зовнішнього джерела (генератор панорамного вимірювача КСХН та послаблень Р2-69 і генератор шуму) були імітовані електромагнітні коливання з суттєво різними частотними спектрами: вузькосмуговий (неперервний) сигнал, ЧМ-сигнал та сигнал з відносно широкою смугою частот, більшою за 0,2 ГГц. На рис. 3.8 зображені результати вимірювання за допомогою РС неперервного сигналу частоти 51,9 ГГц, який створювався генератором Р2-69 та надходив до РС через приймальну рупорну антену. Деяка „розмитість” обумовлена особливостями принципу роботи РС, зокрема, точністю визначення частоти в межах смуги частот, що аналізуються системою (фактично це смуга робочих частот тракту ПЧ, 200 МГц).

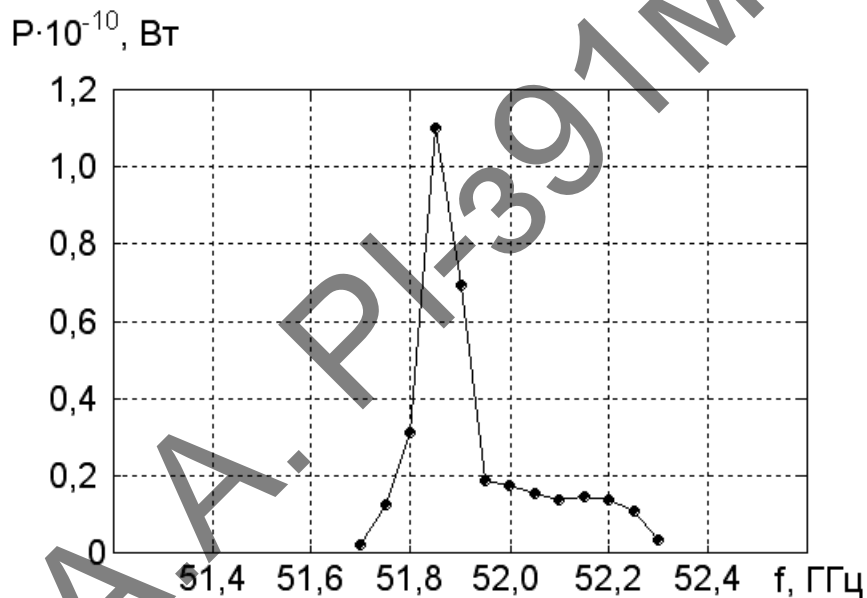


Рисунок 3.8 — Частотна залежність потужності вимірюваного вузькосмугового сигналу

Отже, проведені дослідження показують, що РС дозволяє вимірювати частоту зовнішнього сигналу з похибкою приблизно рівною 0,4%. Проте, враховуючи, що за існуючими стандартами GSM ширина каналу складає біля 4%, цього цілком достатньо для вирішування завдань радіомоніторингу. Слід відзначити, що динамічний діапазон потужності сигналів, що можуть реєструватися систе-

мою значно велик (до 80дБ при застосуванні одного вхідного атенюатору $A1$, рис. 2.13).

Наступним етапом досліджень було вимірювання ЧМ-сигналу, частота якого лінійно змінювалась у часі. Сигнал також створювався за допомогою генератору вимірювача P2-69, який у даному випадку встановлювався в режим коливання частоти від 51,9 до 52,3 ГГц. Фактично цей сигнал імітував канал стільникового зв'язку за стандартом GSM, у якому хаотично виникають монохроматичні випромінювання — сигнали абонентських терміналів. На рис. 3.9 наведені результати вимірювань сигналу. На цій характеристиці можна помітити, що смуга частот реєстрованого сигналу практично відповідає смузі, була встановлена на генераторі P2-69.

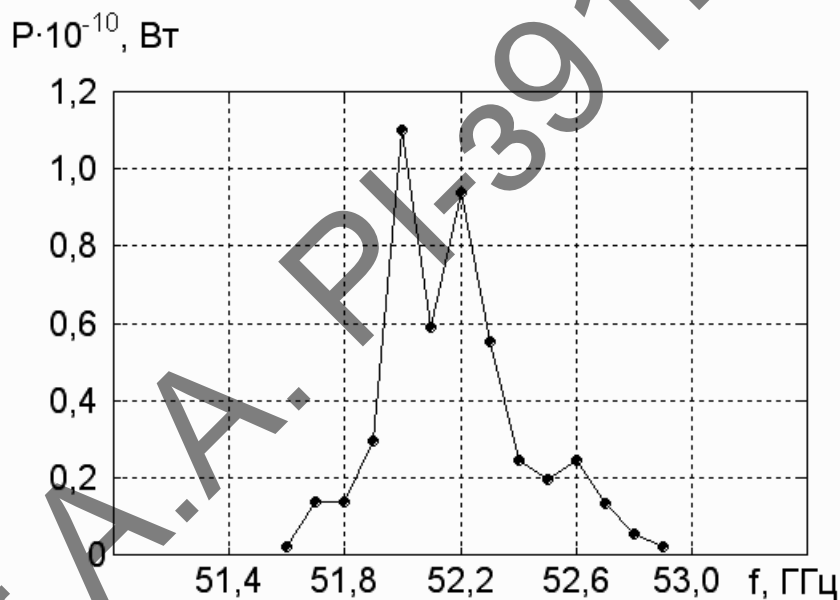


Рисунок 3.9 — Частотна залежність потужності ЧМ-сигналу

Таким чином, запропонована система дозволяє достатньо точно реєструвати форму більш широкосмугових сигналів (більш 1%).

Для підтвердження можливості реєстрування системою шумоподібних сигналів з низьким рівнем середньої потужності (характерних, наприклад, для систем зв'язку за стандартом CDMA) був використаний генератор теплового шуму зі смугою робочих частот 52 – 78 ГГц. Цей генератор був розроблений для

більш високочастотного хвилеводного тракту, і його вихідна потужність на частоті 53 ГГц складала не менш ніж 10^{-11} Вт. Оскільки перетин хвилеводу вихідного тракту генератора був меншим ніж той, що відповідає частотам 37 – 52 ГГц, слід було очікувати, що потужність реєстрованого сигналу буде зменшуватись з частотою. На рис. 3.10 приведені результати вимірювань такого сигналу.

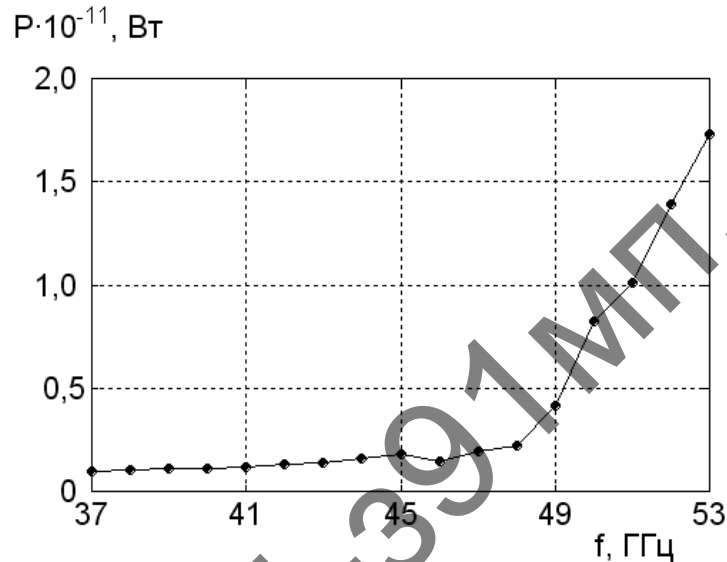


Рисунок 3.10 — Частотна залежність потужності шумоподібного сигналу

Можна помітити, що максимальна потужність відповідає частоті 53 ГГц та складає приблизно $1,7 \cdot 10^{-11}$ Вт. Дана частота лежить у робочому діапазоні частот генератора шуму, і тому для неї потужність реєстрованого сигналу практично відповідає номінальній для генератора шуму. Проте зі зменшенням частоти значення потужності, що реєструється системою стрімко падає. Це повністю відповідає властивості заграничного хвилеводу, яким є хвилевід вихідного тракту генератора для частот, менших від 53 ГГц.

3.3. Обробка результатів вимірювань

Напряга U на виході фільтру ($Z1$) системи відповідає значенню вхідного сигналу, але містить змінну складову низької частоти, що ускладнює проведення вимірювань. В режимі реєстрації даної напруги за допомогою цифрового вольт-

метру можна здійснювати до 10 – 20 спостережень, що дозволяє підвищити точність вимірювань, але залишає їх похибку досить великою. Суттєво зменшити її можна за рахунок збільшення кількості спостережень (до 100 чи 1000), але це потребує застосування комп'ютерної обробки результатів. Використання у складі системи плати інтерфейсу допомагає вирішити дану проблему і таким чином визначити середнє значення та похибку вимірювань у припущенні, що значення U є випадкова величина, яка розподілена по нормальному закону.

Для перевірки цього положення були проведені спостереження напруги U для частоти $f = 45$ ГГц при двох значеннях вхідної потужності: $P_{\text{вх}} = 4,5 \cdot 10^{-13}$ Вт і $1,1 \cdot 10^{-13}$ Вт. Для кожного значення потужності було зроблено біля 100 спостережень. Результати наведені в таблицях 6 та 7.

Таблиця 6 — Значення вихідної напруги у вольтах для $f = 45$ ГГц і $P_{\text{вх}} = 4,5 \cdot 10^{-13}$ Вт (98 вимірів)

0,95	0,95	0,96	0,99	0,95	0,97	0,96	0,98	0,96	0,97
0,96	0,95	0,96	0,99	0,96	0,95	0,99	0,97	0,97	0,96
0,93	0,94	0,96	0,98	0,97	0,94	0,98	0,97	0,96	0,98
0,95	0,93	0,94	0,97	0,96	0,96	0,97	0,95	0,97	0,98
0,94	0,95	0,95	0,96	0,95	0,96	0,97	0,98	0,96	0,97
0,95	0,93	0,96	0,96	0,95	0,95	0,96	0,97	0,95	0,97
0,95	0,95	0,97	0,94	0,96	0,96	0,96	0,98	0,98	0,98
0,96	0,98	0,96	0,97	0,96	0,97	0,96	0,98	0,97	0,96
0,93	0,97	0,97	0,95	0,98	0,99	0,97	0,96	0,97	
0,96	0,94	0,98	0,94	0,95	0,98	0,98	0,98	0,95	

Таблиця 7 — Значення вихідної напруги у вольтах для $f = 45$ ГГц і $P_{\text{ВХ}} = 1,1 \cdot 10^{-13}$ Вт (112 вимірів)

0,34	0,38	0,35	0,32	0,36	0,36	0,38	0,25	0,31	0,29
0,36	0,35	0,34	0,36	0,35	0,41	0,35	0,31	0,32	0,33
0,34	0,29	0,34	0,34	0,40	0,30	0,28	0,32	0,26	0,30
0,35	0,37	0,39	0,34	0,41	0,38	0,33	0,34	0,33	0,34
0,33	0,28	0,38	0,29	0,39	0,40	0,31	0,33	0,35	0,36
0,30	0,35	0,34	0,33	0,33	0,39	0,35	0,28	0,35	0,40
0,34	0,30	0,35	0,36	0,33	0,38	0,35	0,36	0,31	0,34
0,37	0,31	0,30	0,30	0,32	0,42	0,34	0,40	0,36	0,31
0,36	0,37	0,35	0,34	0,31	0,44	0,36	0,39	0,34	0,36
0,35	0,33	0,34	0,38	0,41	0,36	0,33	0,37	0,30	0,38
0,33	0,35	0,30	0,31	0,28	0,33	0,30	0,31	0,32	0,33
0,40	0,28								

Статистична обробка даних проводилась за допомогою програми *Axim 7.0*. Діапазон розкиду значень U був розбитий на рівні проміжки, після чого будувалась гістограма, висота стовпчиків якої дорівнює частини загальної кількості спостережень, яка опинилась у тому чи іншому інтервалі гістограми. На рисунках 3.11 та 3.12 приведені гістограми, а також апроксимуючі їх криві.

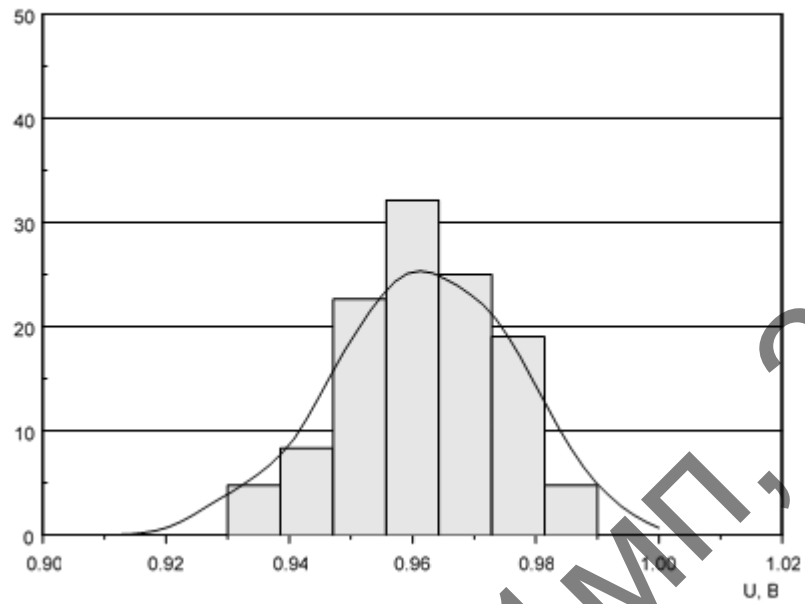


Рисунок 3.11 — Щільність ймовірності та параметри розподілу результатів вимірювань для $P_{BX} = 4,5 \cdot 10^{-13}$ Вт

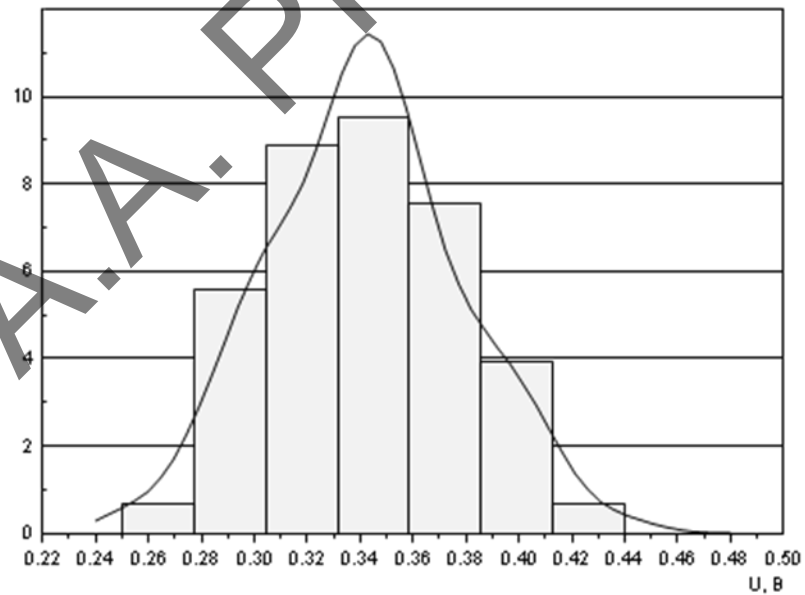


Рисунок 3.12 — Щільність ймовірності та параметри розподілу результатів вимірювань для $P_{BX} = 1,1 \cdot 10^{-13}$ Вт

Як видно з рисунків, розподіл близький до нормального, для якого похибка вимірювань пропорційна $1/\sqrt{n}$. Тому для сигналів з рівнем потужності біля по-

рогу чутливості РС необхідно збільшити n та користуватися програмно-апаратними засобами обробки даних.

Висновки до розділу 3

В результаті проведених експериментальних досліджень приймальної системи мм-діапазону була оцінена її здатність реєструвати як вузькосмугові та і широкосмугові сигнали низької інтенсивності, які за параметрами схожі на ті, що поширюються в радіоканалах систем зв'язку. Як показав експеримент система дозволяє визначати частоту сигналу з похибкою не більше 0,4%, має поріг чутливості не більше $3 \cdot 10^{-14}$ Вт, а динамічний діапазон (із застосуванням вхідного атенюатора) понад 80 дБ. Тому така вона може успішно використовуватися як засіб для проведення радіомоніторингу каналу зв'язку в діапазоні частот 37 – 53 ГГц.

Для підвищення точності слід застосовувати метод вимірювань з багатьма спостереженнями, і відповідно програмно-апаратні засоби обробки даних.

4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

У даному розділі розглянуто економічні показники використання радіометричних засобів. Визначено потенційні ринки збуту та проаналізовано конкурентоспроможність устаткування, що використовується.

4.1 Опис ідеї проекту

Під час розробки стартап-проекту проведено аналіз суті ідеї, можливі сфери застосування, основні якості даного товару, що може отримати користувач, на відміну від існуючих аналогів.

Таблиця 4.1 — Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Певний пристрій та методолія за допомогою яких стає можливо проведення моніторингу каналу зв'язку мм-діапазону.	Визначення неконтрольованого витоку інформації з каналу зв'язку та рівня завад на приймальних антенах систем мм-діапазону.	Повна заміна у використанні дорогих аналізаторів спектру. Простіший інтерфейс для користувача.
	Проектування систем мм-діапазону.	Здешевлення вартості етапу проектування мережі мм-діапазону за рахунок того, що немає необхідності у використанні дорогої вимірювальної апаратури.

Конкурентами на ринку є як вітчизняні так і зарубіжні виробники існуючих засобів вимірювальної апаратури для дослідження спектру сигналів мм-діапазону.

Таблиця 4.2 — 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				✓	

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В даному підрозділі представлені основні результати огляду програмного забезпечення, за допомогою якого було проведено збір та оброблення даних.

Для обробки даних вирішено обрати таке програмне забезпечення:

1. *Google Sheets* — програми для роботи з електронними таблицями, продукт випускається компанією Google.

2. *Matlab 2018b* — пакет прикладних програм для чисельних та інженерних розрахунків або аналізу числових даних.

3. Програмне забезпечення самостійно розроблене для цих задач.

Таблиця 4.3 — Технологічна здійсненність проекту

№ 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				

Для роботи в даному проекті, обрано ПЗ *Matlab 2018b*, оскільки даний пакет, повністю забезпечує можливість визначення необхідних економічних показників, проте як розробка власного ПЗ є відносно дорогою.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В даному розділі представлено результати проведеного аналізу ринкової спроможності запропонованого засобу проведення радіомоніторингу (товару), тобто можливість комерціалізації даного проекту, та аналіз можливих економічних загроз. Аналіз таких характеристик дозволяє теоретично напрямки та стратегії розвитку комерційного проекту по виготовленню та способу продажу виробів.

Таблиця 4.4 — Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	До 5
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

6	Середня норма рентабельності в галузі, %	300%
---	--	------

За результатами аналізу можна зробити висновок, що ринок є відносно монополізованим основними учасниками, проте ціна входу на ринок обумовлена лише якістю продукту, що випускається, оскільки цільова аудиторія — заможні люди. Крім того, визначено потенційні групи клієнтів.

Таблиця 4.5 — 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, рівню сигналів, що відповідають стандартам 5G	Оператори мобільного зв'язку 5G, підприємці, політики, військові структури.	Не досліджувалось в рамках даного проекту.	Спрощення та здешевлення процесу моніторингу сигналів мм-діапазону

В таблиці 4.6 наведено дані для аналізу ринкового середовища, а саме фактори, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та фактори, що можуть перешкоджати цьому..

Таблиця 4.6 — Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Не готовність основної цільової аудиторії використовувати основні методи моні-	Компанії та приватні особи не готові використовувати нетрадиційні методи та не перевірені засоби для моні-	Конкуренція

торингу зв'язку.	каналу	торингу каналу зв'язку.	
------------------	--------	-------------------------	--

Таблиця 4.7 — Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Новий функціонал та 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 4.8 — Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції - монополістична	Декілька виробників, зі світовим ім'ям	Значний
За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний	Виробництва розташовані в різних країнах світу.	Значний
За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Конкуренція відбувається в межах однієї ніші	Значний
Конкуренція за видами товарів – невідомо		
За характером конкурентних переваг – цінова		Значний
За інтенсивністю – невідомо		

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції у галузі.

Таблиця 4.9 — 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 вимірвальну апаратуру	Наукові центри, що проводять дослідження на цю тематику	Невідомо	Компанії та приватні особи зацікавлені в таємниці інформації	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, є висока ймовірність конкуренції з боку компаній монополістів на ринку. Продукт цікавий для потенційних клієнтів економічною складовою, оскільки має значно меншу вартість, а також функціоналом, що високо ціниться в даній ніші.

Перелічимо фактори конкурентоспроможності.

Таблиця 4.10 — Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Витратні матеріали	Система багаторазового використання
2	Розміри	Система порівняння в розмірах з аналогами
3	Швидкодія	Отримання інформації та її оброблення відбувається безпосередньо під час вимірювання
4	Трудомісткість виготовлення	Точність при виготовленні апаратури
5	Градування	Потрібно проводити градування апаратури

		при різних метеоумовах
--	--	------------------------

Таблиця 4.11 — SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Витратні матеріали Розміри Швидкодія	Слабкі сторони: Невідомий виробник Відносно малий розмір стартового капіталу
Можливості: Розширення функціональних можливостей Нові методи	Загрози: Апарати-замінники із Китаю

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

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

На основі вище описаного аналізу, розробляється ринкова стратегія, що передбачає напрямки охоплення ринку, в першу чергу це так званий портрет потенційного покупця.

Таблиця 4.12 — 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	Підприємці та політики, що користуються для передачі даних технологіями 5G	Готові	Високий	У сегменті є конкуренція	Важко

Які цільові групи обрано: Підприємці та політики, що користуються для передачі даних технологіями 5G

Для роботи в обраних сегментах ринку сформулюємо базову стратегію розвитку.

Таблиця 4.13 — 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 4.14 — Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопроходцем» 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

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Сформуємо маркетингову концепцію товару, який отримає споживач.

Таблиця 4.15 — Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конку-
-------	---------	----------------------------	-------------------------------

			рентами
1	Моніторинг каналів зв'язку міліметрового діапазону для знаходження каналів витоку інформації.	Швидкість оцінки характеристик у каналі зв'язку мм-діапазону та значне здешевлення його дослідження	Ціна, швидкодія, простота використання, точність.

Таблиця 4.16 — Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
1. Товар за задумом	Моніторинг каналів зв'язку міліметрового діапазону.
2. Товар у реальному виконанні	Властивості: 1. Витратні матеріали 2. Розміри 3. Швидкодія 4. Трудомісткість виготовлення 5. Налаштування
	Якість: проведення експериментальних досліджень
	Пакування: коробка
	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.

Таблиця 4.16 — 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	1,5 – 300 тис. USD	Невідомий	Високий	10 – 50 тис. USD.

Визначимо оптимальну систему збуту

Таблиця 4.17 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	Продажі в інтернеті та продажі через дистрибуторські компанії

Розробимо концепцію маркетингових комунікацій

Таблиця 4.18 — 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 можливос-	Донесення про можливості та

				ті приладу	сильні сторони розробки
--	--	--	--	------------	-------------------------

Висновки до розділу 4

За результатами проведеного аналізу ринку можна зробити висновок, що в майбутньому є можливість ринкової комерціалізації проекту, оскільки попит знаходиться в фазі активного формування, компанії зі світовим ім'ям уже починають випускати серійні продукти для технології 5G . Оскільки стандарти 5G на сьогоднішній день, ще не впроваджені, але перевіряються нові розробки та можливості використання вже діючої апаратури, то важливо мати готовий продукт до стадії, серійного випуску компаніями конкурентами.

Фесюк А.А. РІ-391МД, 2020

ВИСНОВКИ

1. Проведений огляд сучасних технологій бездротового зв'язку свідчить про тенденцію використання все більш високочастотних діапазонів, зокрема міліметрового. У той же час аналіз спектральних характеристик інформаційних сигналів і завад у радіоканалі дозволяє стверджувати про їх схожість із шумовими сигналами. Таким чином, для проведення радіомоніторингу каналу зв'язку міліметрового діапазону можливе застосування приймальної системи радіометричного типу. Така система має чутливість за потужністю в 10-100 разів вищу, ніж відомі приймачі та аналізатори спектру, і дозволяє спростити проведення радіомоніторингу та знизити його собівартість.

2. Запропоновано метод проведення моніторингу каналу зв'язку радіомереж і обґрунтовано можливість його застосування для радіомоніторингу. Показано, що більш доцільним є використання модуляційної схеми радіометричного приймача мм-діапазону. Така система дозволяє визначати рівень завад у радіоканалі, його пропускну здатність та енергетичну ефективність.

3. Запропоновано вдосконалення синхронного детектора низькочастотного блоку функціонуючої радіометричної системи, що дозволило зменшити її поріг чутливості на 10–20%.

4. Експериментальні дослідження метрологічних характеристик діючої радіометричної системи мм-діапазону показують можливість її використання для проведення радіомоніторингу каналу зв'язку, зокрема у додаткових діапазонах стільникового зв'язку покоління 5G. Поріг чутливості запропонованої приймальної системи складає близько $3 \cdot 10^{-14}$ Вт (мінус 105 дБм), що дозволяє реєструвати сигнали у мережах мобільного зв'язку, рівень потужності яких за вимогами стандартів лежить в межах мінус (100–60) дБм.

5. Проведено аналіз ринку та визначено, що в майбутньому є можливість комерціалізації проекту, оскільки попит знаходиться в фазі активного формування, зокрема компанії зі світовим ім'ям уже починають випускати серійні продукти для технології 5G.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Яненко О.П. Радіометричний модуляційний вимірювач інтенсивності оптичного випромінювання / О.П. Яненко, С.В. Михайленко, А.С. Ліснічук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2014. – № 56. – с. 96-101.
2. Яненко О. П. / Метрологія медичної та біологічної апаратури. – Навчальний посібник. – Житомир: Житомирський інженерно-технологічний інститут. – 1998. – 154 с.
3. CDMA Direct sequence [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://freesourcecode.net/matlabprojects/58351/cdma-matlab-code#.XO04_dT7SyY (дата звернення: 10.11.2020).
4. Яненко О. Особливості та проблеми вимірювання низькоінтенсивних сигналів міліметрового діапазону [Текст]/ Яненко Олександр, Прокоф'єв Михайло, Перегудов Сергій // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні — 2018. — № 1(35). — С. 116–121
5. 5G [Електронний ресурс], 2001–2020. — Режим доступу: http://new.rpls.ru/wp-content/uploads/2017/04/2015_Tikhvinskiy_4G_5G.pdf (дата звернення: 10.11.2020).
6. Магліцкий Б.Н Основы технологии OFDM. Навчальний посібник. Новосибірськ – 2016. – 116.
7. Банкет В. Л. Методы передачи информации в системах беспроводного доступа к телекоммуникационным сетям нового поколения / В. Л. Банкет — Одесса: ОНАС, 2013. — 178 с.
8. Індикатори поля. D.A.S. [Електронний ресурс], 2020. — Режим доступу: <https://www.das-ua.com/katalog/obladnannya-dlya-viyavleniya-kanaliv-vitoku-informacii/#cat3> (дата звернення: 10.11.2020).

9. Сканыючі приймачі. D.A.S. [Електронний ресурс], 2020. — Режим доступу: <https://www.dasua.com/katalog/skanuyuchi-prijmachi/> (дата звернення: 10.11.2020).
10. Пошукові комплекси Delta X. D.A.S. [Електронний ресурс], 2020. — Режим доступу: <https://www.das-ua.com/katalog/obladnannya-dlya-viyavlennya-kanaliv-vitoku-informacii/#cat2> (дата звернення: 10.11.2020).
11. 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
12. 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> (дата звернення: 15.11.2020).
13. 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> (дата звернення: 15.11.2020).
14. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат., Ленингр. отд., 1988. — 304с.
15. 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.
16. Алмазов-Долженко К. И. Коэффициент шума и его использование на СВЧ / К. И. Алмазов-Долженко. — М. : Научный мир, 2000. — 240 с.
17. Регламент радиосвязи. Том 1 Статьи / Международный союз электросвязи. — Женева : ITU, 2008. — 416 с.
18. Арслан Х. Сверхширокополосная беспроводная связь / Х.Арслан, Чж.Х.Чен, М.Бенетто; перев. с англ. Н.Л.Бірюкова. — М.: Техносфера, 2012. — 640 с.

19. Скрынников В.Г. Предварительная оценка параметров сети UMTS/HSDPA / В.Г. Скрынников // Т-Comm. — 2008. — № 3. — С. 34–37.
20. 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.
21. Основы теории мобильной и беспроводной связи [Электронный ресурс] / siblec.ru, 2018. — Режим доступа: <http://siblec.ru/index.php?dn=html&way=bW9kL2h0bWwvY29udGVudC84c2VtLzA3NS8yLTQtNC5odG0> (дата звернения: 15.11.2020).
22. Skou N. Microwave Radiometer Systems: Design and Analysis / N. Skou, D. Le Vine. — [2nd ed.]. — Boston-London: Artech House, 2006. — 227 p.
23. Системы мобильной связи: Учеб. пособ. / [Ипатов В. П., Орлов В. И., Самойлов И. М. и др.]. — М.: Горячая линия-Телеком, 2003. — 272 с.
24. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. // Под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. — 800 с.
25. Efficient MMSE-SQRD-Based MIMO Decoder for SEFDM-Based 2.4-Gb/s-Spectrum-Compressed WDM VLC System/ Yiguang Wang; Yingjun Zhou; Tao Gui et al. // IEEE Photonics Journal. — 2016. — Vol. 8. — No 4, Aug. — P. 1–9.
26. Flore D. 5G-NR workplan for eMBB / Dino Flore. 3GPP. [Электронный ресурс], 2020. — Режим доступа: https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1836-5g_nr_workplan (дата звернения: 21.11.2020).
27. Experimental Demonstration of Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing Transmissions at E-Band / H. Ghannam, D. Nopchinda, M. Gavell et al. // IEEE Trans. on MTT. — 2019/ — Vol. 67. — No. 5, may.— P. 1911–1923.
28. P. Wang, Y. Li, L. Song, and B. Vucetic, “Multi-gigabit millimeter wave wireless communications for 5G: From fixed access to cellular networks,” IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 1, pp. 168–178, Jan. 2015. Spectrally Efficient FDM: Spectrum Saving Technique for 5G? Tongyang Xu and Izzat Darwazeh Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, London, UK.

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

30. Фесюк, А. А. Синхронний детектор з регулюванням фази опорного сигналу / Фесюк А. А. // Радіоелектроніка в ХХІ столітті : матеріали ІІ Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів, 14-16 травня 2019 р., Київ, Україна / КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.— С. 88–89.

Фесюк А.А. РІ-391 МП, 2020

ДОДАТОК А

Публікація за темою дисертації

Фесюк А.А. Р1391МП, 2020

СИНХРОННИЙ ДЕТЕКТОР З РЕГУЛЮВАННЯМ ФАЗИ ОПОРНОГО СИГНАЛУ

Фесюк А. А.

(Науковий керівник Перегудов С. М., к.т.н., доцент)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Радіотехнічний факультет

Синхронне детектування широко використовується у радіоприймальній апаратурі. Даний метод дозволяє інформацію із високочастотного модульованого сигналу, що надходить з попереднього підсилювача А1 шляхом помноження його на опорний сигнал генератора імпульсів G1 у синхронному детекторі (СД) U1 та подальшим виділенням постійної складової сигналу у ФНЧ Z1 (рис. 1).

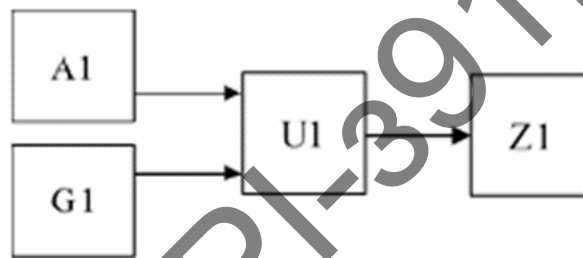


Рис 1. Блок-схема синхронного детектора

Особливістю такого детектування є його завадостійкість та властивість виділяти корисний сигнал на фоні шуму, завдяки цьому існує можливість застосування СД в радіометричних системах, що дозволяють вимірювати вкрай слабкі сигнали, рівень потужності яких, як правило, нижчий за рівень власних шумів системи. Подібні системи застосовуються в області надвисоких частот та дозволяють реєструвати слабкі ($P \leq 10^{-6}$ Вт) та дуже слабкі ($P \leq 10^{-12}$ Вт) сигнали і використовуються в багатьох сферах науки та техніки (радіобачення, біомедицина, зондування земної поверхні тощо). Крім того, СД є складовою частиною ряду мікросистемних пристроїв (гіроскопи та акселерометри)

Проте, чутливість СД, а відповідно й систем, до складу яких він входить суттєво залежить від фазового зсуву між вимірюваним та опорним сигналом. Перевірка СД показала, що при нульовому зсуві вихідна напруга СД максимальна, при 180° вихідна напруга близька до нуля, а при зсуві у 90° складає половину від максимальної. Проте теоретично врахувати зазначений параметри практично неможливо. Тому актуальною є задача доповнити конструкцію СД вузлом, що здійснює регулювання фази між сигналом, що вимірюється, та опорним.

В процесі роботи був проведений аналіз відомих схем синхронного детектування та фазообертачів. Основні схеми побудови синхронного детектору широко описана у літературі (див. наприклад, [1]). Проте, в

II ВНТК Радіоелектроніка у XXI столітті

представлених пристроях відсутня можливість регулювання фазового зсуву між сигналами СД, що суттєво погіршує їх характеристики.

Тому є доцільним введення в схему СД пристрою додаткового зсуву фази, який можна регулювати. Більш простим та надійним, на думку автора, є пристрій, електрична схема якого зображена на рисунку 2.

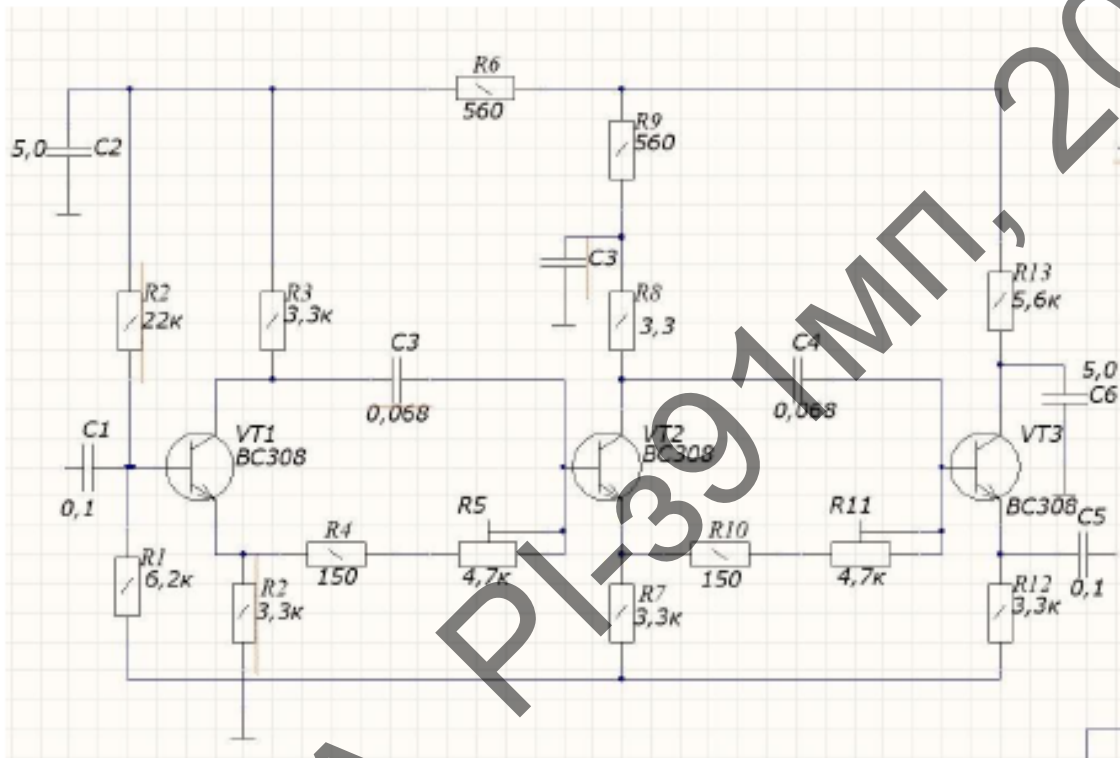


Рис 2. Схема електрична принципова пристрою обертання фази

Принцип роботи фазообертача базується на властивостях резистивного підсилювача [2]. Сигнали, що одночасно знімаються з колектора та емітера є рівними за амплітудою, але протифазні. RC ланка забезпечує потрібний зсув фази опорного сигналу. Коефіцієнт її передачі є комплексним числом, що призводить до набігання різниці фаз між вхідною та вихідною напругами

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega RC)$$

і змінюючи опір резистора, можна забезпечити потрібну фази сигналу.

Розроблений синхронний детектор опробовано в РС мм-діапазону, що зменшило поріг чутливості системи до 10^{-14} Вт.

Література

1. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат., Ленингр. отд., 1988. – 304с.
2. Искусство схемотехники Том 2.. Авторы: Пауль Хоровиц (Paul Horowitz), Уинфилд Хилл . Перевод с английского под редакцией М.В. Гальперина. (Москва: Издательство «Мир». 1986) – 704 с.