

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем
від 2025 року, протокол № .

Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор

_____ Ігор АНІСІМОВ

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**«РОЗРОБКА АНТЕНИ «Коло-СМ» ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЛОКАЛІЗАЦІЇ
ЗАКЛАДНИХ ПРИСТРОЇВ» (Development of the "Коло-СМ" antenna for
detection and localization of embedded devices)**

Виконав:

студент 2-го курсу магістратури

денної форми навчання

спеціальності 172 – Електронні комунікації та радіотехніка

ОНП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»

ПІБ Строгий Владислав Олегович

Науковий керівник:

канд. військових наук, доцент

ПІБ Довбня Сергій Якович

Рецензент:

канд. технічних наук,

ст. науковий співробітник

ПІБ Леоненко Геннадій Павлович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент Владислав СТРОГИЙ

Київ - 2025

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт, 46 с., 17 рис., 8 табл., 11 джерел.

ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ, ЗАХОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ІНФОРМАЦІЇ, КЛАСИФІКАЦІЯ АНТЕН, СТРУКТУРНА СХЕМА, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРОВЕДЕННЯ ТЕСТУВАННЯ КРУГОВОЇ АНТЕНИ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОЧАС-ТОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗАКЛАДНОГО ПРИСТРОЮ.

Об'єкт дослідження – виявлення радіосигналів антеною «Коло-СМ», порівняння за рівнем сигналу та коефіцієнтом підсилення з іншими антенами.

Мета проєкту – створення антени «Коло-СМ», проведення її тестування в дослідному програмно-апаратному комплексі виявлення закладних пристроїв.

Методи – комп'ютерне та технічне тестування програмно-апаратного комплексу. Для проведення експерименту було обрано: 2 антени (GSM + кругова антена), генератор частоти + відповідне ПЗ, спектроаналізатор + відповідне ПЗ, 2 комп'ютери.

Було проаналізовано основні принципи та методи виявлення закладних пристроїв, а також відповідні технічні засоби для їх виявлення. Відповідно до технічних вимог було підібрано сумісне обладнання, здатне виявляти радіозакладні пристрої в частотних діапазонах в межах можливостей використовуваного пристрою (0,1-2,5 ГГц).

У ході експерименту було створено кругову антену для зменшення вартості програмно-апаратного комплексу виявлення закладних пристроїв, проведено тестування на різних частотах та зроблене порівняння з іншими готовими рішеннями.

ЗМІСТ

Зміст.....	3
Вступ.....	4
1 Захист інформації, заходи забезпечення безпеки інформації.....	5
1.1 Захист інформації	5
1.2 Класифікація закладних пристроїв та їх демаскування.....	6
1.3 Організаційні заходи забезпечення безпеки інформації.....	8
2. Класифікація антен, структурна схема, характеристики.....	11
2.1 Антена, їх класифікація.....	11
2.2 Структурна схема, характеристики антен.....	11
2.3 Класифікація антен та їх властивості.....	13
3. Проведення тестування кругової антени для виявлення радіочастотного випромінювання закладного пристрою.....	15
3.1 Підбір компонентів для дослідного зразку.....	15
3.1.1 Генератор частоти.....	15
3.1.2 Аналізатор спектру та програмне забезпечення.....	17
3.1.3 Активна дипольна антена АИ 5-0.....	19
3.2. Створення спрямованої кругової антени.....	21
3.2.1 Створення антени.....	21
3.2.2 Проведення експериментів пошуку закладних пристроїв.....	24
3.2.3 Коефіцієнт калібрування антени.....	31
3.2.4 Покращення програмно-апаратного комплексу виявлення ЗП.....	35
Висновки.....	37
Список використаних джерел.....	38
Додатки.....	39

ВСТУП

У сучасних реаліях інформація є одним з найцінніших ресурсів для держави, бізнесу та приватних осіб. В епоху цифрової трансформації більшість економічних, політичних та особистих процесів базуються на обробці, передачі та зберіганні даних. Витік конфіденційної інформації може призвести до серйозних наслідків: втрати конкурентних переваг, фінансових втрат, порушення національної безпеки та недоторканності приватного життя.

Однією з найбільш підступних загроз сьогодення є використання закладених пристроїв. Вони здатні непомітно збирати інформацію, діючи в різних середовищах - від офісів і державних установ до приватних помешкань. Закладені пристрої стають меншими, розумнішими та краще замаскованими серед побутових електронних приладів, що ускладнює їх виявлення навіть для досвідчених фахівців.

Сучасні закладні пристрої можуть працювати в широкому діапазоні частот і використовувати складні канали передачі даних, включаючи ультразвук, інфрачервоне випромінювання або цифрову модуляцію у радіочастотних діапазонах. Вони можуть активуватися дистанційно, працювати в пасивному режимі до моменту активації або навіть вибирати найменш завантажені частоти для передачі даних.

Тож розробка нових засобів пошуку та локалізації закладних пристроїв та вдосконалення вже існуючих є нагальним та потребує подальшого розвитку.

1. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ, ЗАХОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Захист інформації

Захист інформації - це комплекс дій, розроблених для запобігання порушенню конфіденційності, цілісності та доступності інформації, а також на захист її від несанкціонованих змін. Захисту підлягає інформація в будь-якій формі та поданні, включно з даними та програмним забезпеченням автоматизованих систем, неправомірні дії з якими можуть завдати шкоди власникам, користувачам або іншим учасникам інформаційної діяльності. Це може спричинити значні втрати у сферах науково-технічної, адміністративно-господарської та комерційної діяльності організацій, підприємств і держави.

Методи захисту конфіденційної інформації розрізняються за рівнем надійності. Згідно до НД ТЗІ 1.4-001-2000 [1] для визначення необхідного рівня використовують моделі захисту об'єктів (організацій різних форм власності), що дають змогу оцінити кількість і ефективність технічних засобів, що використовуються для досягнення поставлених цілей.

Актуальність інформаційної безпеки в сучасних умовах пояснюється низкою чинників:

- широким розповсюдженням та ускладненням технологій з використанням інформації;
- необхідністю захисту різних форм таємниць: державно, військової, промислової, комерційної та фінансової;
- зростанням загрози несанкціонованого доступу до інформації під час її зберігання, передання та оброблення.

Інформація, яка підлягає захисту, класифікується залежно від рівня конфіденційності та ступеня її важливості для організації чи держави. Класифікувати можемо:

За рівнем доступу:

- відкрита інформація – доступна для всіх, не має обмежень у використанні;

- конфіденційна інформація – має обмежений доступ, призначений лише для певного кола осіб;
- таємна інформація – інформація, доступ до якої є засекреченим, та розголошення може призвести до загрози безпеці організації або держави;
- цілком таємна інформація – найвищий рівень захисту, призначений лише для осіб з відповідним доступом;

За рівнем впливу при витоку:

- низький рівень ризику – незначні наслідки від розголошення;
- середній рівень ризику – можливість фінансових або репутаційних втрат;
- високий рівень ризику – може призвести до серйозних наслідків, у тому числі загрозу безпеці або кримінальну відповідальність;

1.2 Класифікація закладних пристроїв та їх демаскування

Залежно від середовища, в якому поширюються акустичні коливання, що перехоплюють ЗП, класифікують: акустичні, радіозакладні пристрої та радіостетоскопи.

Відповідно до методу передавання перехопленої інформації, ЗП поділяють:

1. із передачею через радіоканал у діапазоні 5 кГц-6,5 ГГц;
2. із передачею через інфрачервоний канал;
3. із передаванням сигналу через струмопровідні лінії у діапазоні 0,01 – 15 МГц;
4. із записом звуку на портативні носії.

У радіо закладних пристроях для передачі інформації використовується енергія електромагнітних хвиль, які можуть поширюватися на велику відстань, долаючи різноманітні перешкоди.

Такі закладні пристрої можуть працювати в будь-якому діапазоні радіохвиль.

За режимом роботи у часі ЗП класифікують на такі типи:

1. з безперервним випромінюванням (постійної дії);
2. активовані зовнішніми звуковими сигналами;
3. з дистанційним керуванням;
4. з накопиченням інформації та її передаванням за короткий проміжок часу;

5. із вбудованим таймером.

Закладки постійної дії використовуються для збору інформації протягом обмеженого часу, тривалість якого залежить від способу живлення пристрою. Для продовження часу роботи передавача його можуть оснастити системою голосової активації (VAS або VOX), яка вмикає передавання лише при наявності голосу.

Дистанційне керування забезпечує можливість переведення пристрою в активний режим тільки під час переговорів або передачі даних через канали зв'язку, що підвищує рівень скритності та дозволяє суттєво подовжити час роботи закладки.

Залежно від джерела живлення, закладні пристрої поділяються на такі категорії:

1. автономні — живляться від батарей, акумуляторів або хімічних джерел енергії;
2. з живленням від мережі або ліній зв'язку;
3. без власного живлення — так звані напівактивні пристрої (аудіо-транспондери), які активуються при опроміненні їх вузькосмуговим високочастотним зондуючим сигналом;
4. живлення від внутрішніх мереж технічного обладнання.

Досить поширеними є ЗП, що встановлюються з камуфляжем, тобто замасковані під предмети побуту. Такі пристрої можуть виготовлятися у вигляді окремого блоку (наприклад, металевий паралелепіпед) або інтегруватися в предмети інтер'єру — книги, вази, картини в рамках. Також закладки можуть бути сховані в елементи телефонного обладнання: конденсатори, мікрофонні чи телефонні капсули, штекери, розетки, а також вбудовані в побутову техніку, радіо- та електроапаратуру.

Крім того, для маскування сигналів передачі ЗП можуть використовувати різні технології, включаючи прості та складні види модуляції, скремблювання і шифрування. Для виявлення таких пристроїв, як і будь-яких інших технічних засобів несанкціонованого доступу, застосовується виявлення за демаскувальними ознаками.

Демаскуючі ознаки закладних пристроїв за зовнішнім виглядом:

1. наявність компактних пристроїв невідомого призначення, що мають плату з радіoeлементами;
2. сторонні або незвичні отвори в корпусі обладнання;
3. виявлення автономних джерел живлення;
4. присутність навісних компонентів або пайки, не характерної для заводського виконання.

Ознаки, які виявляються за допомогою спеціалізованого обладнання:

1. вторинні електромагнітні поля;
2. інформативні сигнали, що циркулюють у мережах зв'язку;
3. наявність радіо- або інфрачервоного випромінювання;
4. напівпровідникові компоненти, що свідчать про наявність електронного пристрою.

Додаткові демаскуючі ознаки ЗП:

1. наявність радіовипромінювання в зоні ближнього поля з інформаційною модуляцією;
2. дріт або антена, що частково виходить з корпусу пристрою;
3. переважання сигналу ЗП над іншими радіоелектронними джерелами у ближньому полі, що супроводжується побічним випромінюванням на гармоніках, субгармоніках або частотах вищих порядків.

Додаткові ознаки напівактивних закладок:

1. потужне зондувальне (гармонійне) випромінювання, спрямоване в бік об'єкта;
2. наявність у приміщенні сигналів зондування, що містять амплітудно або частотно-модульовані акустичні сигнали інформаційного характеру.

1.3 Організаційні заходи забезпечення безпеки інформації

Організаційні заходи щодо забезпечення інформаційної безпеки - це алгоритм дій для контролю доступу до інформаційних ресурсів, встановлення відповідальності персоналу, впровадження правил поведінки з інформацією та формування інформаційної культури в колективі. Ці заходи базуються на чинному зако-

нодавстві України, зокрема, Законі України «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах», Законі України «Про державну таємницю», а також на інших державних та міжнародних стандартах, таких як:

- ДСТУ 3396.0-96 (Технічний захист інформації (ТЗІ), основні положення);
- ДСТУ 3396.1-96 (ТЗІ, порядок проведення робіт);
- ДСТУ 3396.2-97 (ТЗІ, терміни та визначення);
- ДБН А.2.2-2-96 (Проектування ТЗІ, загальні вимоги);
- НД ТЗІ 2.7-011-2012 (Методики виявлення закладних пристроїв).
- ДСТУ ISO/IEC 27001 [2].

Класифікація організаційної діяльності:

1. Адміністративні заходи:

- розробка політики інформаційної безпеки - створення нормативних документів, що регламентують заходи з інформаційної безпеки;
- регулювання доступу до інформації - визначення рівнів доступу для працівників та впровадження систем ідентифікації та аутентифікації;
- призначення відповідальних осіб – управління ІТ-спеціалістів та служб безпеки, відповідальних за захист інформації;
- моніторинг та аудит інформаційної безпеки - регулярне дотримання стандартів та політик безпеки.

2. Організаційно-правові заходи:

- розробка нормативної документації - положень, інструкцій, стандартів роботи з інформацією;
- правовий захист інформації - ведення діяльності відповідно до правових норм (наприклад, Закон України «Про захист інформації»);
- зобов'язання про нерозголошення (NDA) - підписання угод про нерозголошення конфіденційної інформації.

3. Контроль та управління ризиками:

- оцінка загроз та ризиків - аналіз можливих загроз для інформації;

- планування реагування на інциденти - розробка плану дій на випадок витоку даних або кібератаки;
- резервне копіювання - регулярне резервне копіювання важливих даних та їх зберігання в безпечному середовищі.
- 2. Стандарти та нормативно-правова база:
- ISO/IEC 27001 – міжнародний стандарт управління інформаційною безпекою;
- COBIT, NIST 800-53 – методика управління інформаційною безпекою;
- Закон України "Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах" .

2. КЛАСИФІКАЦІЯ АНТЕН, СТРУКТУРНА СХЕМА, ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1 Антена, їх класифікація

Анテナ - це технічний пристрій, який перетворює спрямовані електромагнітні хвилі в радіохвилі, і навпаки - приймає радіохвилі з космосу і передає їх на пристрій у вигляді спрямованих хвиль. Вона є невід'ємною частиною будь-якої радіотехнічної системи. Основне призначення - випромінювати або приймати електромагнітні хвилі, забезпечуючи зв'язок між електричними ланцюгами передавального або приймального пристрою і простором, в якому поширюються радіохвилі. [3]

Антени є пасивними компонентами радіосистем і конструктивно являють собою поєднання провідників і магнітодіелектриків.

Антени класифікуються за такими ознаками:

1. Згідно їх передавальних та приймальних характеристик
2. за діапазоном частот антени (широкосмугові та вузькосмугові);
3. гостроспрямовані, слабкоспрямовані і ненаправлені.

Також антени можна розділити згідно до їх конструкції:

1. антени з лінійними струмами (антени, в яких струм протікає по каналах);
2. апертурні антени (антени, які випромінюють через отвір, що називається апертурою (наприклад, рупор, лінза, дзеркало));
3. антени поверхневих хвиль (збуджуються електромагнітними хвилями, що поширюються вздовж антени).

2.2 Структурна схема, характеристики антен

Загальна структура антени має: вхід, узгоджувальний пристрій, розподільник і випромінювальну систему рис.2.1.

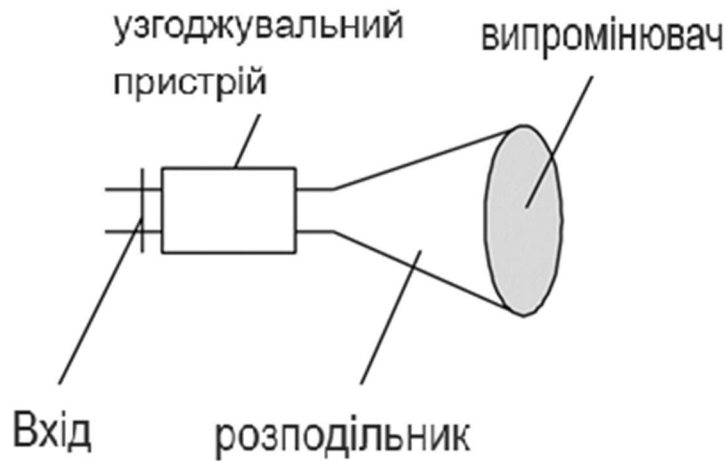


Рисунок 2.1 - Структурна схема антени.

Поділ антени на розподільник і випромінювальну систему зумовлений класичним підходом до розрахунку антен, згідно з яким завдання проєктування розділяється на дві частини: зовнішню та внутрішню.

1. внутрішня частина - визначення розподілу високочастотних струмів у випромінювальній структурі;
2. зовнішня частина - це аналіз електромагнітного поля, створеного відомим розподілом струмів, а також розрахунок основних характеристик антени, таких як ширина головного променя, рівень бічного випромінювання, коефіцієнт спрямованої дії (КНД) тощо.

Векторна комплексна діаграма спрямованості може бути записана як:

$$E = \left| \frac{Z_c}{2\lambda} \right| \cdot \eta_1 \cdot I_a \cdot F(\theta, \varphi) \cdot \frac{(e^{-j \cdot k \cdot R})}{R} \quad (2.1)$$

Де Z_c – хвильовий опір розповсюдження, η_1 – коеф. узгодження, I_a – амплітуда струму, $F(\theta, \varphi)$ – діаграма спрямованості, R – відстань до точки спостереження, k – хвильове число, e^{-jkR} – фазовий множник.

Коефіцієнт підсилення (G) показує, у скільки разів антена посилює сигнал у порівнянні з ізотропним випромінювачем, записується формулою [4]:

$$G = \eta \cdot D \quad (2.2)$$

де η - коефіцієнт ефективності антени, D — спрямованість.

Невід'ємна характеристика антени - потужність електромагнітних хвиль, що випромінюються антеною у вільний простір, вона визначається формулою:

$$R_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{I_d^2} = \frac{P_{\Sigma}}{I_m^2} \quad (2.3)$$

де I_m – значення амплітуди, I_d – діюче значення.

Значення випромінюваної потужності чисельно дорівнює потужності, яка виділялася б на активному опорі, якби до нього був прикладений змінний струм тієї ж потужності, що і випромінювана потужність. [5]

Опір втрат, що визначає втрати потужності при випромінюванні (втрати при проходженні струму через дроти антени), записується формулою:

$$R_{\Pi} = \frac{P_{\Pi}}{I_d^2} = \frac{P_{\Pi}}{I_m^2} \quad (2.4)$$

2.3 Класифікація антен та їх властивості

За конструктивними ознаками можна класифікувати такі типи антен (додаток А):

1. лінійні антени (призначені для простого прийому та випромінювання електромагнітних хвиль шляхом створення струмів в одному напрямку);
2. рамкові антени (прийом електромагнітного поля, зокрема магнітної складової поля, ефективні для низьких та середніх частот);
3. щілинні антени (функціонують за рахунок розподілу струмів уздовж щілин у провідникових екранах);
4. активні антени (інтегрують підсилювальні елементи в антенну структуру, що дозволяє компенсувати втрати у тракті передачі сигналу);
5. групові антени (складаються з сукупності елементарних випромінювачів, просторово розташованих із заданими фазовими зсувами);
6. апертурні антени (використовують геометричну площу випромінювання (апертуру) для ефективного формування вузькопроменевих діаграм).

Наведемо порівняльну таблицю з наявними перевагами, неділоками та іншими складовими типів антен (табл.2.1).

Табл.2.1 – Порівняльна характеристика типів антен

Тип антени	Поляризація	F, ГГц	Переваги	Недоліки	Ка (dBi)	Ціна
лінійна	вертик./горизонт.	0.01 - 10+	проста конструкція, широко застосовується	обмежена спрямованість, та чутливість	2-5	від 300 грн
рамкова	горизонт/кругова	до 3	висока чутливість до магнітної складової поля,	менший коефіцієнт підсилення	0-2	від 200 грн
щілинна	вертик.	1–30+	висока спрямованість, стійкість до навантаження	складна металообробка, висока вартість	6-12	від 1000 грн
активна	вертик./горизонт.	до 3–6	підсилення сигналу на вході	потреба в живленні, можливі шуми підсилювача	10-20	від 1500 грн
групова	лінійна, кругова або еліптична	0.1-10+	регульована діаграма спрямованості	висока складність розрахунку та синхронізації	10-25	від 800 грн
апертурна	лінійна або кругова	2 – 100+	високий коеф. підсилення, вузька діаграма спрямованості	великі габарити, складність у виготовленні	20-45	від 3000 грн

Тому для зменшення вартості дослідного програмно-апаратного комплексу пошуку закладних пристроїв було прийнято рішення щодо створення кругової все-направленої антени, яка є підтипом рамкових антен. Вона є оптимальним вибором завдяки своїй низькій вартості, простоті у створенні та широкому охопленні сигналів, незалежно від напрямку.

3. ПРОВЕДЕННЯ ТЕСТУВАННЯ КРУГОВОЇ АНТЕНИ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОЧАСТОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗАКЛАДНОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Підбір компонентів для дослідного зразку

3.1.1 Генератор частоти

Для імітування закладного пристрою на різних частотах було обрано векторний генератор сигналів Signal Hound VSG25A, показаний на рис.3.1, призначення якого - генерація складних сигналів, які широко використовуються в сучасних системах бездротового зв'язку. Генератор працює в діапазоні частот від 100 МГц до 2,5 ГГц, забезпечуючи амплітуду вихідного сигналу від -40 дБм до +10 дБм і смугу модуляції до 100 МГц. Ці робочі частоти охоплюють більшість телекомунікаційних діапазонів, включаючи основні діапазони ISM - 902-928 МГц і 2,4-2,5 ГГц.

Якщо високі вимоги до параметрів сигналу не потрібні, пристрій може працювати від 80 МГц з розширеним амплітудним діапазоном від -80 дБм до +13 дБм. Живлення генератора здійснюється через інтерфейс USB, що спрощує його використання в мобільних умовах.

Задання налаштувань роботи генератора сигналу задається за допомогою спеціального ПЗ VSG25 vector signal generator software [6] на комп'ютері оператором.

Основними перевагами є:

1. невеликі розміри і вага - всього 150 г, пристрій легко транспортувати і він може поміститися навіть у кишені;
2. помірна ціна – близько 40 тисяч грн;
3. АМ / FM: швидкість модуляції від 30 Гц до 40 МГц;
4. імпульс: ширина від 6 нс до 25 мс, період від 12 нс до 1 секунди;



Рисунок 3.1 - генератор сигналів Signal Hound VSG25A.

Сигнал передавався на звичайну GSM антену за допомогою відповідного штекера, робочий діапазон частот 0.7-2.7 ГГц (рис.3.2).

Кругова діаграма спрямованості антени дозволяє добре приймати вхідний сигнал на 360° в горизонтальній площині. При роботі антени на стаціонарних або мобільних об'єктах немає необхідності коригувати положення BS-700/2700-2M відносно джерела вхідного сигналу.



Рисунок 3.2 - GSM антена.

3.1.2 Аналізатор спектру та програмне забезпечення

Було обрано аналізатор спектру Signal Hound USB-SA44B, показаний на рис.3.3, через найкраще співвідношення ціни-якості, та відповідності визначення частот для наших цілей (до 2,5 ГГц).

Спектроаналізатор USB-SA44B підключається до комп'ютера через USB-інтерфейс і може працювати з різним програмним забезпеченням. Прилад забезпечує робочих діапазон частот - від 1 Гц до 4,4 ГГц, що дозволяє використовувати його для широкого кола вимірювальних завдань. Динамічний діапазон становить від -151 дБм до +10 дБм, а смугу частотної роздільної здатності можна регулювати від 0,1 Гц до 250 кГц або до 5 МГц. Пристрій має малошумний попередній підсилювач, який активується на частотах вище 500 кГц.

Вбудований вимірювальний приймач має великий динамічний діапазон:

- від 0 дБм до -125 дБм для частот від 150 кГц до 1 ГГц;
- від 0 дБм до -115 дБм в діапазоні 1-4,4 ГГц;

Відносна похибка вимірювання становить 0,25 дБ, а похибка при вимірюванні амплітуди АМ/ФМ сигналів - до 1%. Прилад оптимально підходить для аналізу вузькосмугових сигналів (до 20 МГц) і повністю сумісний з комп'ютерами під управлінням операційної системи Windows

Додатковою перевагою USB-SA44B також є те, що він може працювати як вимірювальний приймач або аналізатор фазового шуму в діапазоні від 1 Гц до 250 кГц відносно несучої. Він також підтримує прослуховування демодульованих АМ, ФМ і односмугових (SSB) сигналів та може працювати в режимі реального часу зі смугою пропускання до 250 кГц.



Рисунок 3.3 - аналізатор спектру Signal Hound USB-SA44B.

Генератор USB-TG44A працює з ліцензійним програмним забезпеченням Spike: Signal Hound [7], наданим виробником при купівлі пристрою.

Програмне забезпечення Spike містить широкий набір алгоритмів пошуку та обробки сигналів, надає потужний інструментарій для роботи з аналізаторами спектру Signal Hound, розширюючи їх можливості до рівня професійних векторних аналізаторів сигналів.

Його функції охоплюють ключові завдання в області бездротового зв'язку, електромагнітної сумісності, цифрової модуляції, аналізу завад і автоматизованого управління. Основні переваги:

1. аналіз в реальному часі;
2. аналіз бездротових мереж 802.11 WLAN (вбудовані інструменти для аналізу модуляції WLAN, включаючи вимірювання фізичного рівня (PHY));
3. вимірювання електромагнітної сумісності;
4. цифрова демодуляція (перетворення аналізатора спектру на векторний аналізатор сигналів, підтримуючи вимірювання EVM і відображаючи складні графіки цифрової модуляції PSK/QAM);
5. вимірювання фазового шуму (тестування компонентів або цілих систем зв'язку і захисту, забезпечуючи недороге, але точне рішення для аналізу одностороннього фазового шуму);

6. спектральна емісійна маска (перевірка відповідності сигналів спектральним маскам пропускання, використовуючи як вбудовані шаблони, так і користувацькі конфігурації);
7. пошук радіоперешкод (виявлення, візуалізація та аналіз сигналів, які викликають перешкоди в бездротових системах, що є ключем до усунення несправностей);
8. віддалене керування та автоматизація SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) (керування пристроями Signal Hound через TCP/IP за допомогою команд, можлива інтеграція з будь-якою мовою програмування або системою, що підтримує SOCKET-з'єднання або бібліотеки VISA);
9. скалярний мережевий аналіз (використовування аналізаторів спектра в якості скалярних мережевих аналізаторів, що робить їх доступним рішенням для вимірювання частотної характеристики мікрохвильових пристроїв);
10. режим зняття фону – фіксація «дружніх сигналів» та панорами;
11. Формування електронних звітів або в PDF – файл; На відміну від штирьової

3.1.3 Активна дипольна антена АИ 5-0

Для тестування отриманих результатів було використано відкалібровану дипольну антену АИ 5-0, показана на рис.3.4. Ця антена призначена для вимірювання напруженості синусоїдальних, шумових та імпульсних електричних полів. Призначення даної антени:

1. забезпечення електромагнітної сумісності для електронного обладнання;
2. захист інформації від витоку по електромагнітних каналах;
3. контроль гранично допустимих рівнів електромагнітного випромінювання в рамках заходів з охорони навколишнього середовища.

Технічні характеристики:

- діапазон робочих частот: 0,009-2000 МГц;
- номінальне значення : 28 дБ/м;

- відхилення (на частоті 10 МГц): не більше ± 2 дБ;
- нерівномірність АЧХ : не більше 10 дБ;
- сумарна похибка калібрування: не більше ± 2 дБ;
- максимальна вимірювана напруженість поля: 145 дБ (мкВ/м) при внутрішньому загасанні антени -20 дБ;
- порогова чутливість (частота, DF = 1 Гц): від 8 до -37 дБ (мкВ/м) в залежності від частоти;
- вихідний опір: 50 Ом;
- коефіцієнт стоячої хвилі напруги (VSWR): не більше 2,5;
- струм споживання: до 200 мА при 12,6 В;
- розміри (довжина вібраторів): 170 мм
- вага: 0.8 кг;



Рисунок 3.4 - Активна дипольна антена АИ 5-0.

Наразі антена АИ 5-0 більше не поставляється до України через санкції, тож аналогом може бути аналог української розробки - ЕМА-2000 (0.009-2000 МГц), вартість з перевіркою – 150 000 грн.

3.2 Розробка спрямованої антени

Для пошуку та локалізації джерел сигналу використовується антена, тож її вибір відіграє ключову роль. Наразі існує багато варіантів за ціною та відповідними характеристиками. Одним з найпростіших варіантів є використання штирьової антени через її всенаправленість, проте для здешевшання дослідного зразку та покращення отриманих результатів, було обрано створити кругову антену.

Кругова антена забезпечує більш чітке просторове покриття. Її діаграма спрямованості сконцентрована в горизонтальній площині, що дозволяє краще фокусувати прийом або випромінювання в потрібному напрямку, зменшуючи вплив шумів з небажаних напрямків, таких як земля або небо. Ця характеристика особливо цінна в міських або складних умовах, де кількість відбитих сигналів і перешкод значна. Антена є пасивною, проте за параметрами наближена до активної антени. На противагу штирьовій антені, яка має всеспрямовану (діаграму спрямованості і приймає сигнали з будь-якого напрямку з однаковою інтенсивністю, спрямована антена дозволяє визначати напрямок джерела сигналу. Це дозволяє використовувати її в системах радіопеленгації та просторового аналізу спектра.

Також, завдяки своїй геометрії ця антена може краще придушувати сторонні перешкоди, підвищувати точність вимірювання сигналу і знижувати загальний шум каналу. Вона також зручна для інтеграції в мобільні або портативні системи, де необхідно забезпечити круговий прийом без фізичного повороту антени.

3.2.1 Створення антени

Антена буде названою «Коло-СМ» вона являє собою випромінювач, що розстеляється безпосередньо на поверхні ґрунту, виконаний із сукупності коаксіальних кабелів зі знятою оболонкою й екранним обплетенням (дротів в ізоляції). Забезпечення високого рівня узгодження в робочому діапазоні досягається шляхом спеціально підібраної форми випромінювача, що має шунгові провідники і задовольняє принципу самодоповнення. Використання шунтів підвищує захист виходу передавача (входу приймача) від електромагнітних імпульсів і блискавичних розрядів.

Антенa включає полотно (1) , фідер (2) і вузол стику (3), та виконується у вигляді нероз'ємної конструкції. Полотно антени виготовляється з 8 відрізків коаксіального кабелю марки RG-6U (75 Ом) зі знятою оболонкою та екранним обплетенням. Чотири відрізки (4) утворюють плечі випромінювача і мають довжину по 30 см. Чотири відрізки (5) (штрихові лінії) утворюють шунти випромінювача, а їхні крайні частини входять до складу плеча. Довжина відрізків (5) по 31,6 см (рис.3.5).

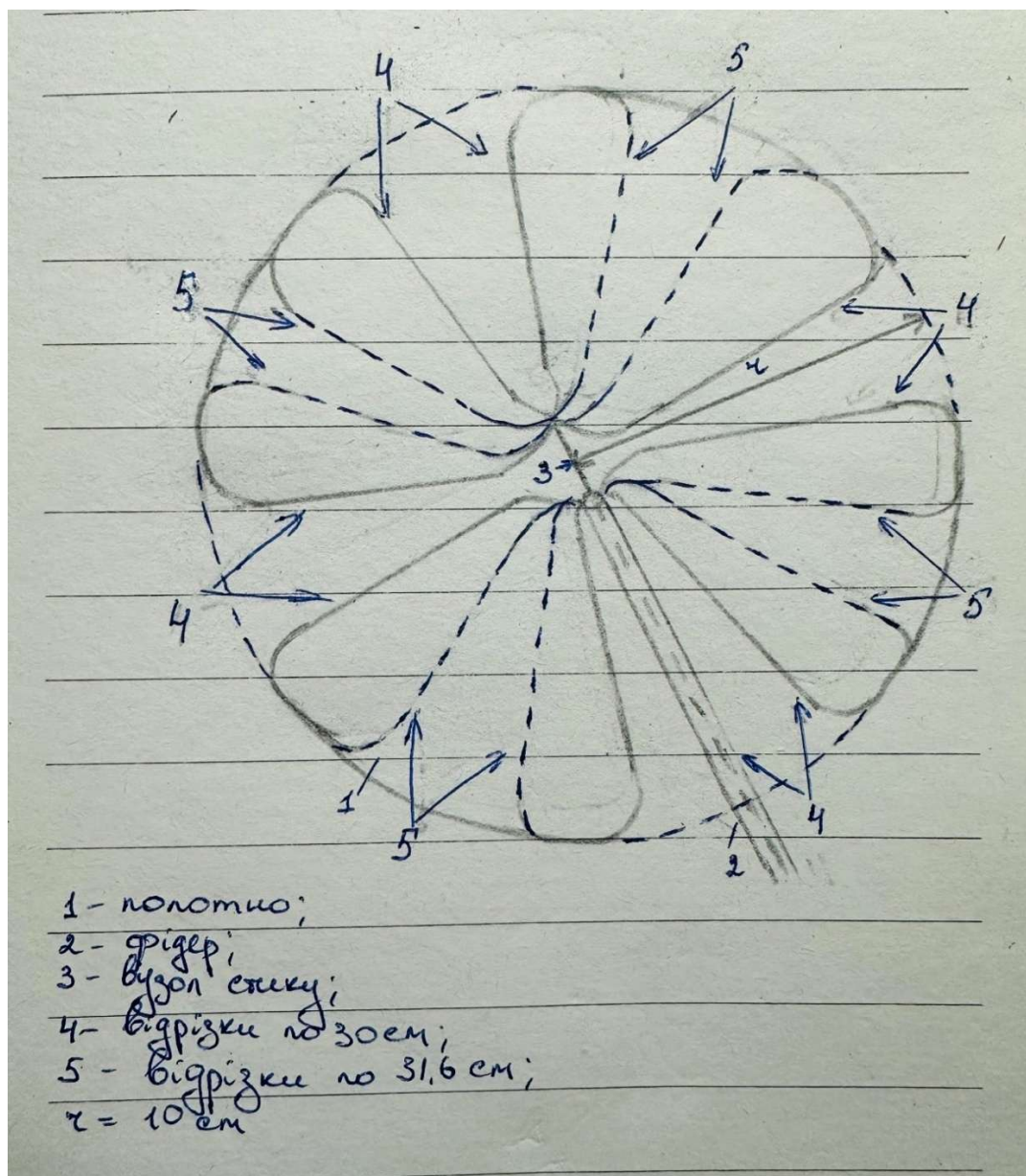


Рисунок 3.5 - Схема кругової антени «Коло-СМ» .

Фідер антени виготовляється з відрізка коаксіального кабелю від 15 см. Вузол стику (3) забезпечує підключення провідників плечей і шунтів антени до виходу коаксіального фідера.

До центрального провідника фідера припаюються провідники двох плечей, шунта, розташованого між цими плечима, і кінці двох сусідніх шунтів. До екранного обплетення припаюються два інші кінці цих шунтів, провідники протилежних плечей і шунта між ними. Таким чином, на центральний провідник фідера і його обплетення під'єднано по 8 сусідніх кінців провідників полотна антени.

Сумарна витрата коаксіального кабелю на виготовлення полотна антени становить близько 2.5 м.

Пелюстки антени вкладаються на полотно радіусом 10 см послідовно (рис.3.6). Таким чином ми отримуємо 8 пелюстків на полотні, з частотою на прийом та випромінювання – до 3 ГГц. У такому діапазоні частот ми можемо визначити такі загрози:

1. радіомовлення (FM-радіо 88-108 МГц, АМ-радіо 530-1710 кГц);
2. мобільний зв'язок (GSM 900 МГц та 1800 МГц, 3G – 2,1 ГГц, 4G – 0.7-2.6ГГц);
3. Wi-Fi (2.4 ГГц);
4. Bluetooth (2.4 ГГц);
5. супутникові системи (GPS, Galileo, GLONASS – 1.2-1,6 ГГц);
6. бездротові мікрофони, пульти дистанційного керування (144МГц, 433 МГц, 1.2 ГГц, 2.4 ГГц).

Загальні характеристики антени наведені в табл.3.1.

Табл.3.1 – Загальні характеристики антени «Коло-СМ» .

Вхідний опір	75 Ом
Роз'єм	СР-75
Поляризація	Горизонтальна
Робочий діапазон	До 3 ГГц

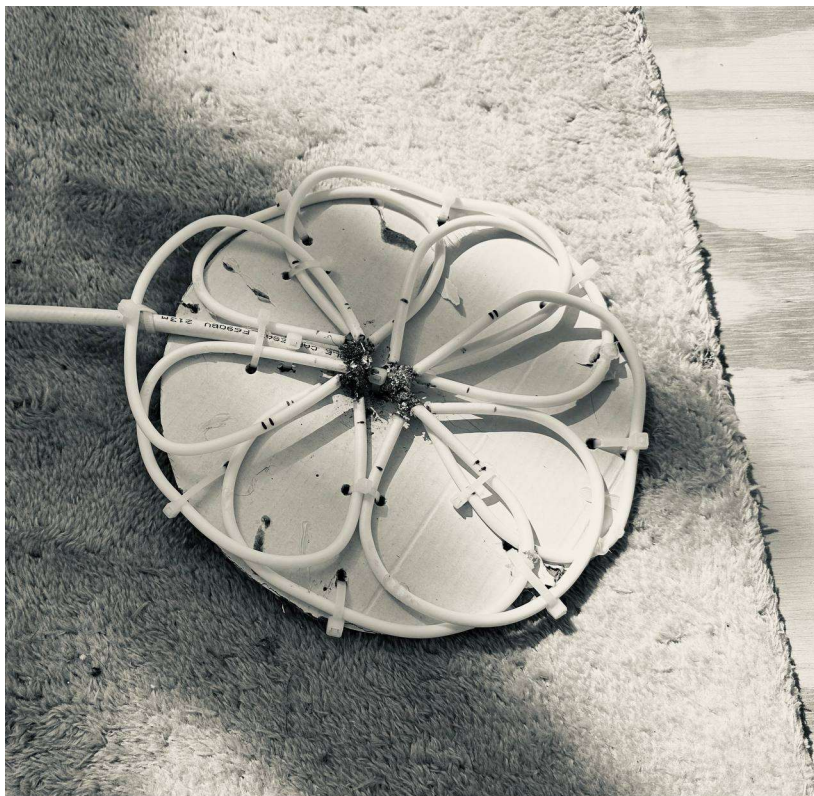


Рис.3.6 - Спрямована кругова антена «Коло-СМ» .

3.2.2 Проведення експериментів пошуку закладних пристроїв

Проведемо аналіз радіочастотної обстановки з метою виявлення сигналів ЗП з передачею інформації радіоканалом. Важливо відкласти робочі та особисті радіо-пристрої або їх сигнал не потрапляв до нашого сканування.

Для початку, підключаємо генератор сигналу USB-TG44A за допомогою відповідного кабелю з роз'ємом CP-75 до антени GSM з однієї сторони, та до комп'ютера з програмним забезпеченням «VSG25 vector signal generator» через порт USB. Налаштовуємо, задавши відповідні параметри в програмі.

Після цього під'єднуємо з одного боку, за допомогою USB, аналізатор спектру USB-SA44B до другого комп'ютера та налаштовуємо його в програмному забезпеченні «Spike: Signal Hound». З іншої сторони спектроаналізатор під'єднується до відповідної антени, якою відбувається пошук закладного пристрою.

Перше тестування проводилось на відстані 100 см від закладного пристрою, коли він знаходить навпроти нашої антени. Розмір закладного пристрою (в нашому випадку антени, під'єднаної до генератора сигналу) – 22 см у висоту, розташування

при 17°. Для перевірки отримання коректного результату, було проведено тестування активною дипольною антеною АИ 5-0, оскільки вона вже була попередньо відкалібрована та мала відповідну сертифікацію (рис.3.7)



Рисунок 3.7 – Тестування дипольною антеною АИ 5-0.

Калібрування антени проводилось на частоті від 0.1 до 2.5 ГГц, тож було проведено перевірку саме в цьому діапазоні. Генератор сигналів налаштовувався з одного комп'ютера, збільшуючи крок на 0.1 ГГц, фіксування результату проводилось з другого комп'ютера за допомогою програми «Spike» (рис.3.7).

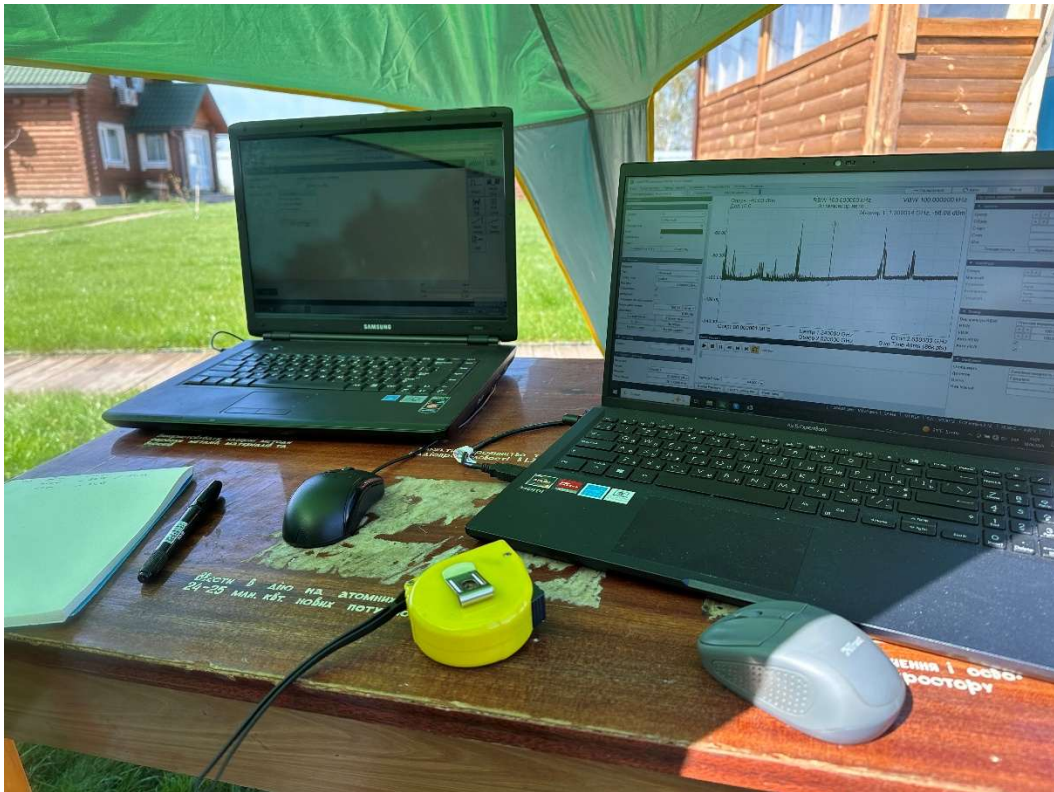


Рисунок 3.7 – налаштування ПЗ VSG25: vector signal generator та Spike: Signal Hound.

Отримані результати наведені в табл.3.2 та на рис. 3.8:

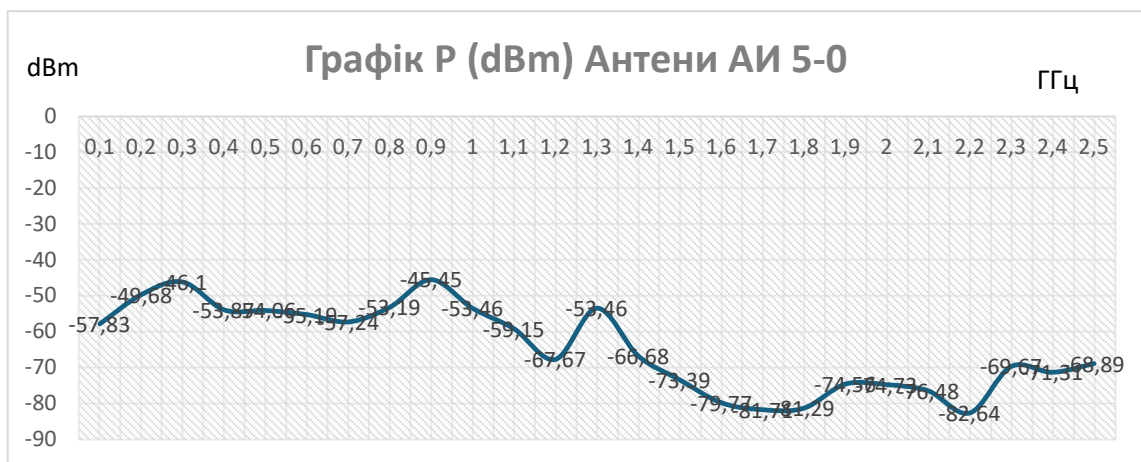


Рисунок 3.8 – Графік отриманих результатів антеною АИ 5-0 на частоті 0,1-2,5 ГГц.

Табл. 3.1 – Отримані результати на частоті 0,1-2,5 ГГц.

F (ГГц)	P (dBm)
0,1	-57,83
0,2	-49,68

0,3	-46,1
0,4	-53,87
0,5	-54,06
0,6	-55,19
0,7	-57,24
0,8	-53,19
0,9	-45,45
1.0	-53,46
1,1	-59,15
1,2	-67,67
1,3	-53,46
1,4	-66,68
1,5	-73,39
1,6	-79,77
1,7	-81,71
1,8	-81,29
1,9	-74,56
2.0	-74,73
2,1	-76,48
2,2	-82,64
2,3	-69,67
2,4	-71,31
2,5	-68,89

Як видно з таблиці, найсильніший рівень сигналу спостерігався для частоти 900 МГц – (-45.45 dBm), найслабший рівень сигналу для 2.2 ГГц – (-82.64 dBm).

Аналогічне тестування проводимо для нашої антени «Коло-СМ», підключаючи її до спектроаналізатора за допомогою роз'єму СР-75. Звіряємо отримані результати (рис. 3.9, таб.3.3).

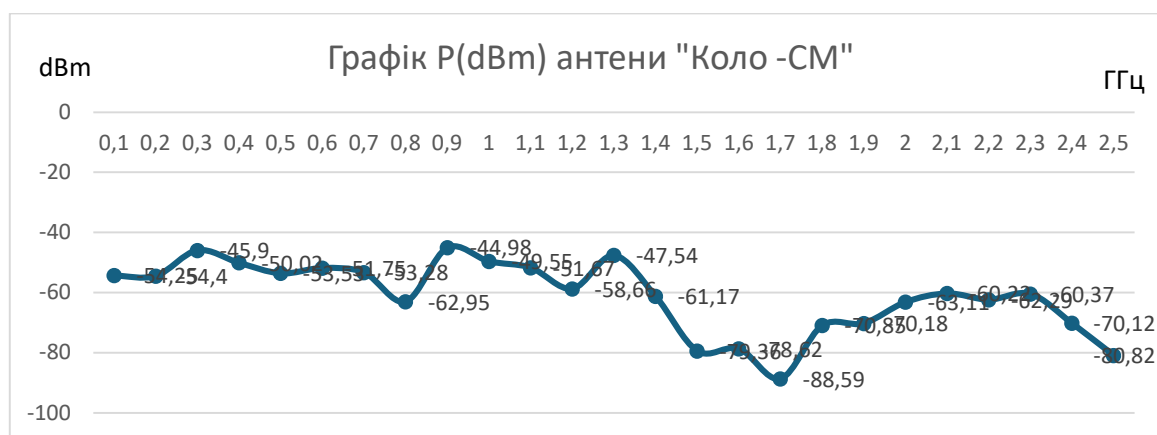


Рисунок 3.9 – Графік отриманих результатів антеною «Коло-СМ» на частоті 0,1-2,5 ГГц.

Табл. 3.1 – Отримані результати на частоті 0,1-2,5 ГГц.

F (ГГц)	P (dBm)
0,1	-54,25
0,2	-54,4
0,3	-45,9
0,4	-50,02
0,5	-53,53
0,6	-51,75
0,7	-53,28
0,8	-62,95
0,9	-44,98
1,0	-49,55
1,1	-51,67
1,2	-58,66
1,3	-47,54
1,4	-61,17
1,5	-79,36
1,6	-78,62
1,7	-88,59
1,8	-70,85
1,9	-70,18
2,0	-63,11
2,1	-60,22
2,2	-62,29
2,3	-60,37
2,4	-70,12
2,5	-80,82

Найсильніший рівень сигналу ми отримали на частоті 900 МГц (-44.98 dBm), найслабший – 1.7 ГГц – (-88.59 dBm). Порівнюючи результати з каліброваною антеною, маємо дуже схожі результати:

- найсильніший рівень сигналу на 900 МГц для антени АИ 5-0- (-45.45 dBm), та (-44.98 dBm) для «Коло-СМ» ;
- найслабший рівень сигналу для антени АИ 5-0 спостерігався на частоті 2.2 ГГц – (-82.64 dBm), для «Коло-СМ» на частоті 1.7 ГГц – (-88.59 dBm).

З отриманих результатів бачимо, що отримані дані відповідають дійсності, графіки також доволі схожі.

Наступний експеримент проводимо при зміні розташування закладного пристрою, коли він знаходиться вище, за нашу антену. Стаціонарний розмір антени – 22 см, розташування при 17° . Збільшуємо висоту закладного пристрою за допомогою підручних засобів – звичайні відра, оскільки вони є діелектричними. Висота кожного 23-25см. Розташування змінюється відповідно по 17° . Відстань від нашої антени до закладного пристрою залишається сталою – 1м. (рис.3.10).



Рисунок 3.10 – Зміна розташування у висоту закладного пристрою.

З проведених результатів, отримали такі дані (табл. 3.3, рис. 3.11)

Табл. 3.3 – Отримані значення тестування при 1 ГГц.

H (см)	P (dBm)	$K_{\text{ум}}$ (°)
0	-49,55	0
22	-49,89	17
45	-57,44	34
65	-51,58	51

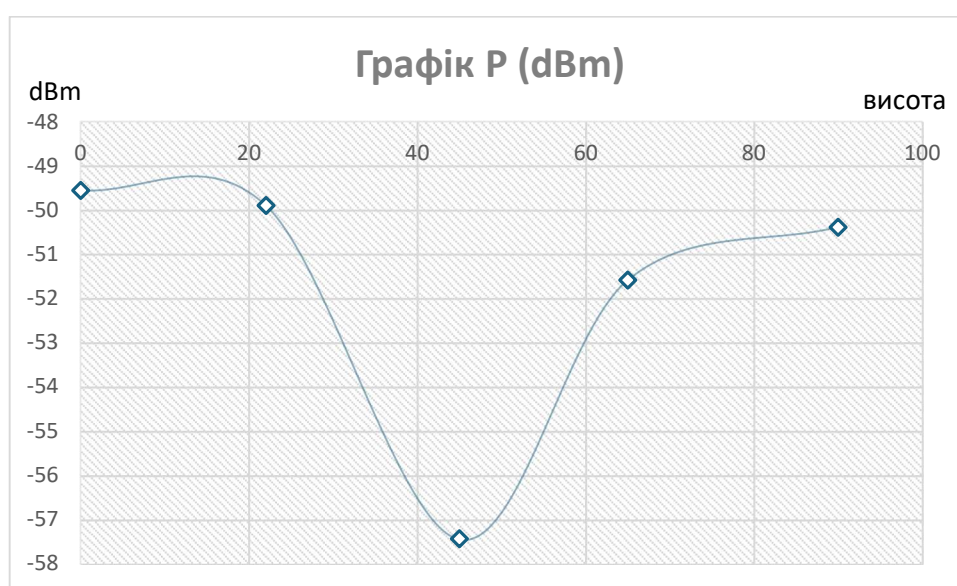


Рисунок 3.11 – Графік отриманих результатів на частоті 1 ГГц.

З результатів видно, що наша кругова антена має горизонтальну поляризацію та найсильніший рівень сигналу на частоті в 1 ГГц досягається при 17°. Зі збільшенням висоти до певного рівня, рівень сигналу погіршується.

Наступний експеримент проводиться при зміні розташування закладного пристрою (антени) для його пошуку та локалізації в діапазоні від 0 до 360°. Відстань залишається сталою – 1м, частота – 1 ГГц. Тестування починаємо зі здвигом в 45°, поки не повернемося в початкову точку (табл.3.4).

Табл.3.4 - Отримані значення тестування при зміні розташування ЗП від 0 до 360°.

<i>Кут (°)</i>	<i>P (dBm)</i>
0	-50,85
45	-51,75
90	-60,99
135	-61,36
180	-54,51
225	-57,48
270	-61,69
315	-51,1
360	-50,85

Найсильніший рівень сигналу спостерігається при тому, коли закладний пристрій знаходиться навпроти верхнього пелюстка антени, що показує нам, що він є направляючим та згідно нього ми отримуємо наші результати. Діаграма спрямованості з отриманих результатів має вигляд (рис.3.12):

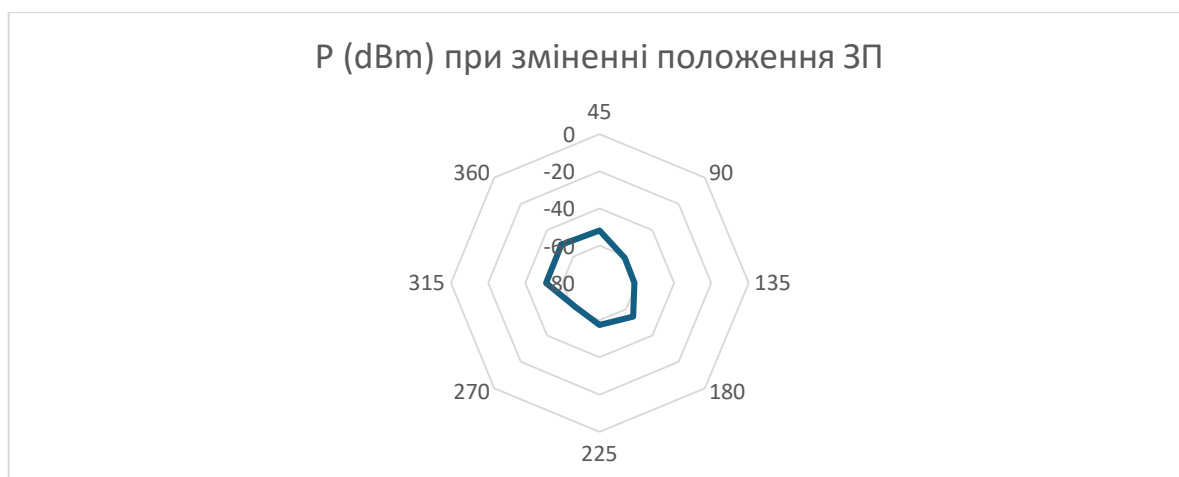


Рис.3.12 – Діаграма спрямованості антени «Коло-СМ» при 1 ГГц.

3.2.3 Коефіцієнт калібрування антени

Коефіцієнт калібрування антени (Ка або AF - Antenna Factor) - це величина, яка дозволяє нам перетворити виміряну напругу на виході антени в реальне значення напруженості електричного поля в місці прийому.

Визначити коефіцієнт калібрування (відносно 1мкВ) можна за формулою:

$$K_a = E - U \quad (3.1)$$

Де:

K_a - коефіцієнт калібрування;

E - напруженість електричного поля;

U - виміряна напруга на виході антени.

Для антени АИ 5-0, використаємо коефіцієнт калібрування з сертифікації для частоти від 0.1 до 2.0 ГГц (табл.3.5).

Табл.3.5 – Дані тестування та коефіцієнт калібрування антени АИ 5-0.

F (GHz)	Ka_1	P_1	$P_{отр}$
0,1	32,8	-57,83	-25,03
0,2	30,7	-49,68	-18,98
0,3	31,1	-46,1	-15
0,4	31,8	-53,87	-22,07
0,5	32,1	-54,06	-21,96
0,6	30,5	-55,19	-24,69
0,7	32,7	-57,24	-24,54
0,8	29,8	-53,19	-23,39
0,9	29,3	-45,45	-16,15
1.0	32,5	-53,46	-20,96
1,1	34,6	-59,15	-24,55
1,2	36,6	-67,67	-31,07
1,3	36,2	-53,46	-17,26
1,4	39,5	-66,68	-27,18
1,5	43,8	-73,39	-29,59
1,6	48,9	-79,77	-30,87
1,7	53,4	-81,71	-28,31
1,8	45,4	-81,29	-35,89
1,9	38,9	-74,56	-35,66
2.0	46,4	-74,73	-28,33

З отриманих даних зробимо графік для наочності (рис.3.13):

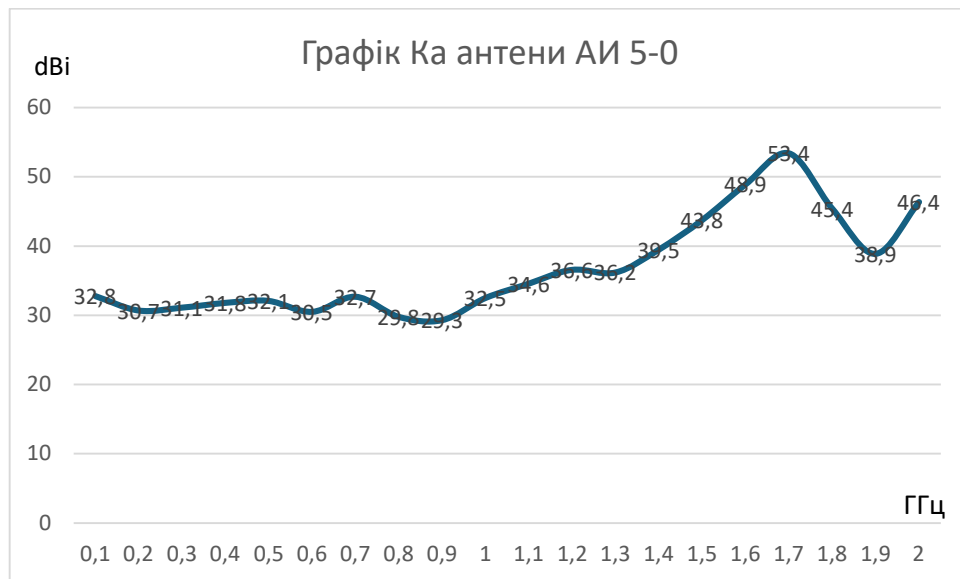


Рисунок 3.13 – Графік коефіцієнту калібрування антени АИ 5-0.

Використовуючи формули (3.2, 3.3), виведемо коефіцієнт калібрування для антени «Коло-СМ» та запишемо в табл.3.6.

$$P_1 - Ka_1 = P_{отр} \quad (3.2)$$

$$P_{отр} - P_2 = Ka_1 \quad (3.3)$$

Де:

$P_{1,2}$ - рівень сигналу, dBm;

$Ka_{1,2}$ – коеф. калібрування антени 1,2;

$P_{отр}$ – отримане значення рівня сигналу dBm;

Табл.3.6 – Дані тестування та коефіцієнт калібрування антени «Коло-СМ» .

$F (GHz)$	Ka_1	P_2	$P_{отр}$
0,1	29,22	-54,25	-25,03
0,2	35,42	-54,4	-18,98
0,3	30,9	-45,9	-15
0,4	27,95	-50,02	-22,07
0,5	31,57	-53,53	-21,96
0,6	27,06	-51,75	-24,69
0,7	28,74	-53,28	-24,54
0,8	39,56	-62,95	-23,39

0,9	28,83	-44,98	-16,15
1,0	28,59	-49,55	-20,96
1,1	27,12	-51,67	-24,55
1,2	27,59	-58,66	-31,07
1,3	30,36	-47,54	-17,18
1,4	33,99	-61,17	-27,18
1,5	49,77	-79,36	-29,59
1,6	47,81	-78,62	-30,81
1,7	52,7	-88,59	-35,89
1,8	34,96	-70,85	-35,89
1,9	34,52	-70,18	-35,66
2,0	34,78	-63,11	-28,33

Для наочності зробимо відповідний графік за отриманими результатами (рис3.14):

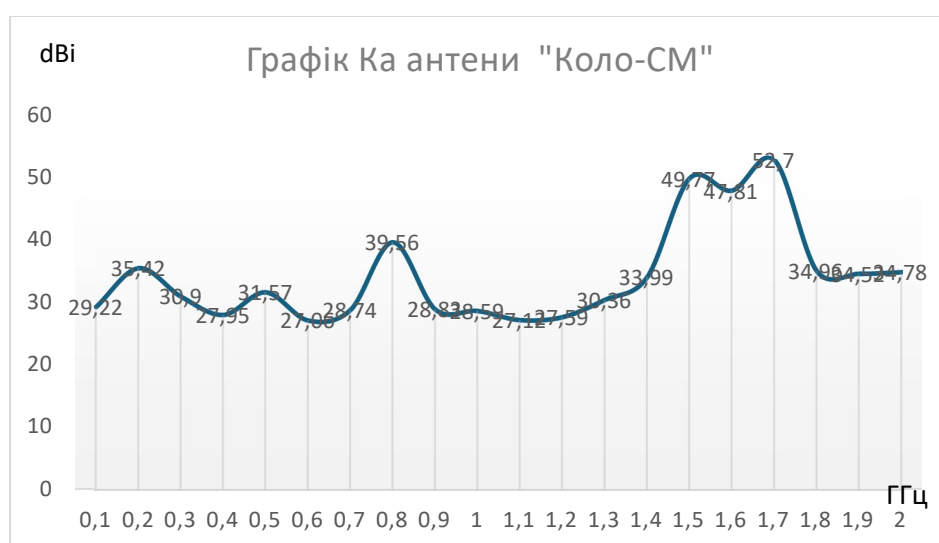


Рисунок 3.13 – Графік коефіцієнту калібрування антени «Коло-СМ» .

Вартість пошукового комплексу з використанням кругової антени «Коло-СМ» є якісним інструментом для пошуку та локалізації закладних пристроїв. По своїм характеристикам, не поступається аналогічним антенам (штирвова, логоперіодична та ін.), проте є значно дешевшою, та в деяких аспектах кращою.

Вартість комплексу:

- «Коло-СМ» : коаксіальний кабель 3 м RG-6U (75 Ом) – близько 150 грн; матеріали для паяння 250 грн (флюс, припій); полотно для установки $r=10\text{см}$ – з підручних засобів (фанера, картон та ін.) – 50 грн;

- GSM антена – 400 грн;
- генератор USB-TG44A – 45000-50000 грн;
- аналізатор спектру Signal Hound USB-SA44B – 64584-87026 грн;

Загальна вартість – від 110 434 грн до 137 876 грн.

- Вартість антени АИ 5-0 з повіркою для перевірки коректності отриманих даних – 150000 грн.

3.2.4 Покращення програмно-апаратного комплексу виявлення ЗП

Сканувальний діапазон частот антеною «Коло-СМ» може бути збільшеним, шляхом пропорційного збільшення геометричних розмірів антени, згідно до чого буде отримано більшу дальність для передачі та отримання радіохвиль. Це зумовлене тим, що електричні параметри антени, зокрема її резонансні частоти та ефективна апаратура, залежать від фізичних розмірів конструкції.

Покращити пошуковий комплекс ЗП можна також за допомогою сучасних, сертифікованих існуючих систем, до прикладу - Delta 4G з програмним забезпеченням DigiScan EX версії 3.2, під'єднавши нашу антену. Основне призначення даного комплексу – виявлення радіочастотних, дровових та інфрачервоних ЗП. Система забезпечує швидкість спектрального аналізу до 75 МГц/с. Головною перевагою є використання 2-х антен одночасно, що дає змогу ефективно детектувати локалізовані сигнали, незалежно від типу їх модуляції.

ПЗ входить в комплект при купівлі системи та є більш розширеною, в порівнянні з ПЗ Spike. Перевагами є:

1. здійснення широкосмугового та деталізованого сканування, для забезпечення точності отриманих результатів;
2. ефективна ідентифікація сигналів за допомогою спектрального аналізу;
3. використання багатосекторного порогового аналізу, еталонної спектральної панорами;
4. «зняття фону» для локалізації «дружніх сигналів»;
5. вбудований мікрофон у поєднанні з алгоритмами кореляційного аналізу надає класифікацію за рівнем загроз;

6. ведення автоматичного звукозапису для подальшого аналізу;

Для точної локалізації, сканування радіодіапазону має здійснюватися в 2-3 точках навколо об'єкту перевірки для отримання більш надійних результатів пошуку. При аналізі постійно працюючих відомих потужних джерел радіовипромінювання, потрібно забезпечити мінімальний крок та смугу пропускання з метою виявлення сигналів, що маскуються зовнішнім випромінюванням.

Пошук сигналів ЗП системи пошуку ЗП Delta 4G необхідно здійснювати цілодобово (у нічній час в автоматизованому режимі). У випадку виявлення невідомих радіо випромінювань та сигналів з підвищеним рівнем випромінювання, слід занести їх в базу сигналів та провести ідентифікацію і локалізацію.

Загальна вартість комплексу на сьогоднішній день складає близько 280 000.

ВИСНОВКИ

У ході створення експериментального зразка для виявлення закладених пристроїв було встановлено, що використання спрямованої кругової антени типу «Коло-СМ», виконаної на основі коаксіальних кабелів, дозволяє здійснювати ефективний пошук та локалізацію радіочастотного випромінювання закладених пристроїв в діапазоні частот до 3 ГГц. Отримані експериментальні дані показали, що за рівнем і стабільністю сигналу пасивна антена «Коло-СМ» практично не поступається каліброваній антені АИ 5-0, при цьому значно знижуючи загальну вартість пошукового комплексу.

Запропонований в роботі підхід до побудови системи виявлення на основі поєднання генератора сигналів Signal Hound VSG25A з ПЗ «VSG25 vector signal generator software», аналізатора спектра USB-SA44B і спеціалізованого програмного забезпечення «Spike» дозволяє здійснювати ефективний моніторинг в широкому діапазоні частот, з можливістю точного аналізу і локалізації джерел випромінювання. При цьому загальна вартість комплексу є нижчою, в порівнянні з подібними аналогами.

Отримані результати демонструють перспективність використання таких структур для створення мобільних та стаціонарних систем захисту інформації від технічних каналів витоку. Дане рішення також може бути покращеним, збільшуючи конструкцію антени, що дозволить більше розширити сферу застосування пристрою, та використання антени з існуючими системами для пошуку та локалізації ЗП.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. НД ТЗІ 1.4-001-2000, Типове положення про службу захисту інформації в автоматизованій системі, ДСТСЗІ СБ України, 2000 р, 37с.;
2. URL: <https://tzi.com.ua/> (дата звернення: 29.03.2025);
3. Марченко С. В., «Антени та пристрої мікрохвильової техніки», 2020р, 167с.;
4. ХМЕЛЬ В.Ф. Антенны и устройства СВЧ/ В.Ф. Хмель//Сб. задач. — Киев: Вища школа, 1990. — 232 с.;
5. ГУРСЬКИЙ Т.Г., ІЛЬІНОВ М.Д., ШАЦЬКИЙ І.О., Плоскі хвилі. Навчальний посібник /. – К. ВІТІ ДУТ, 2014. – 88 с.;
6. Signal Hound VSG25A User Manual, 2015, Signal Hound, Inc., 14p.;
7. Spike Spectrum Analyzer Software User Manual, 2015, Signal Hound, Inc., 48p.;
8. ІЛЬІНОВ М.Д., ГУРСЬКИЙ Т.Г., БОРИСОВ І.В., ГРИЦЕНОК К.М., Навчальний посібник "Лінії раді'зв'язку та антенні пристрої» 2018, 249с.;
9. ВЕЛЬМІСКІН Д.І. Антенні системи, 2007, - 142 с.;
10. WILTSE J.C. History of Millimeter and Submillimeter waves // IEEE Trans. On MTT.1984. No 9. P. 1118–1127;

Додаток А

Випромінювальні елементи антени, або випромінювачі, є основними компонентами антенних систем. Вони можуть бути представлені як окремими конструкціями, так і складними комбінованими конфігураціями. До них відносяться найпростіші випромінювачі (теоретичні або еталонні моделі) та антени складної форми: лінійні, фігурні, апертурні тощо. [8]

До випромінювачів можна віднести:

- сферичний випромінювач або ізотропна антена. Це ідеалізована модель, яка не має втрат і випромінює електромагнітну енергію однаково в усіх напрямках. Діаграма спрямованості такої антени має форму ідеальної сфери, що теоретично дозволяє порівнювати реальні антени з ідеальним джерелом. Ізотропна антена не може бути реалізована на практиці, але вона широко використовується як еталон для оцінки характеристик спрямованості та коефіцієнта підсилення інших антен;
- диполь Герца: цей тип випромінювача (на честь фізика Г. Р. Герца (1857-1894), який зробив значний внесок у розвиток електродинаміки. Диполь Герца (елементарний електричний випромінювач або електричний вібратор). Конструктивно диполь реалізується як прямий провідник з кінцевими значеннями, довжина якого менша за довжину випромінюваної хвилі. Він використовується для моделювання електромагнітного поля, яке виникає навколо точкового джерела змінного струму. Форма діаграми спрямованості - вісімка в площині, перпендикулярній до осі диполя, з 0-ю інтенсивністю сигналу в напрямку осі;
- диполь Фіцджеральда: елементарний магнітний випромінювач (магнітний вібратор). Він реалізований як струмова рамка малих розмірів порівняно з довжиною хвилі. Така рамка створює магнітне поле, подібне до того, що з'являється в контурі зі струмом, і є моделлю точкового магнітного джерела. На відміну від ізотропного випромінювача, диполь Фіцджеральда має тенденцію випромінювати в площині рамки. Його діаграма спрямованості також

складається з двох «пелюсток». Проте нульові значення інтенсивності - в напрямках, перпендикулярних до площини рамки [9];

- випромінювач Гюйгенса: цей тип випромінювача являє собою комбінацію двох основних структур: невеликої магнітної рамки і короткого електричного вібратора, розміщених в одній площині. Ця комбінація створює синтез електричного і магнітного полів, забезпечуючи кардіоїдну діаграму спрямованості випромінювання. Особливістю випромінювача Гюйгенса є те, що він має єдиний мінімум випромінювання, тобто нульову точку на діаграмі, що робить його ідеальним для використання в системах радіопеленгації. Це дозволяє пристрою точно визначати напрямок на джерело сигналу, що робить його популярним серед навігаційних та пошукових систем.

Антени можна класифікувати за певними конструктивними ознаками:

1. Лінійні антени : одна з найпоширеніших категорій антенних систем, що використовуються в радіозв'язку. Їх основною конструктивною особливістю є розташування провідних елементів уздовж прямої лінії, що забезпечує простоту виготовлення, стабільність параметрів і чітко визначену діаграму спрямованості. Такі антени можуть бути симетричними або несиметричними, резонансними або аперіодичними, вузько- або ширококутовими, залежно від застосування.
 - 1.1 диполь або вібратор: базові симетричні лінійні антени включають диполь або вібратор з живленням в центрі. Найпростішим прикладом є дво полюсник (диполь), довжина якого дорівнює половині довжини хвилі ($\lambda/2$). Історично він також відомий як «дублет». Більш складні варіанти використовують хвильовий вібратор з довжиною λ , відомий як подвійний цепелін, а також подовжений подвійний цепелін з довжиною $1,28\lambda$, що дозволяє досягти більшої спрямованості. Ширококутові вібратори - це різновид симетричних антен з удосконаленою формою, яка забезпечує стабільну роботу в широкому діапазоні частот. Прикладами є конічні вібратори, подвійні конічні вібратори і планарні вібратори (віялові або плоскі

диполі), які використовуються в системах з високими вимогами до частотної гнучкості;

1.2 несиметричний вібратор (монополь: відносяться монопольні антени, які розміщуються над провідною поверхнею (наприклад, над землею). Вони також відомі як уніполі, напівдиполі або антени Марконі. Найчастіше такі антени мають довжину в чверть довжини хвилі ($\lambda/4$), а їхнім зворотним елементом є або реальна земля, або система противаг - так звані Groundplane антени. Існують також варіанти вертикальних антен з довжинами $\lambda/2$ і $5\lambda/8$, які дозволяють поліпшити характеристику спрямованості і зменшити кут підйому основного променя. До широкосмугових несиметричних антен відносяться конічні монополіусні та планарні віялові антени, які забезпечують ефективну роботу в широкому діапазоні частот;

1.3 дротові антени: довжина яких перевищує робочу довжину хвилі. Вони можуть бути як симетричними, так і асиметричними, працювати як на стоячій, так і на біжучій хвилі. Залежно від призначення, дротяні антени можуть бути резонансними (налаштованими на певну частоту) або аперіодичними (широкосмуговими). Прикладами є котушкові антени, аеростатні антени, антени Бевереджа, TFD (закінчений складений диполь) і T2FD - всі вони використовуються переважно в системах далекого прийому, особливо в короткохвильовому діапазоні;

2. рамкові антени - це тип закритих антен, в яких випромінюючі елементи виконані у вигляді рамок. Їх особливістю є циркуляція електричного струму в замкнутому контурі, що створює переважно магнітне поле, яке бере участь в процесі випромінювання або прийому електромагнітних хвиль. Залежно від розміру рамки відносно довжини хвилі, рамкові антени поділяються на:

2.1 мала рамка (магнітна антена) - має периметр значно менший за довжину хвилі - приблизно $1/10\lambda$. Завдяки таким розмірам вона функціонує насамперед як приймальна антена і ефективно працює в діапазонах середніх і

довгих хвиль. Її конструкція проста: як приклад, можна навести намотування звичайної котушки або феритової стрижневої антени, яка широко використовується в побутових радіоприймачах. Незважаючи на невеликі розміри, мала рамка демонструє достатню ефективність і відносно несприйнятливості до електричних перешкод, оскільки реагує в першу чергу на магнітну складову хвилі.

2.2 велика рамка - має периметр, близький до довжини хвилі (приблизно 1λ), і використовується як для прийому, так і для передачі сигналів. Вона має кращі характеристики випромінювання порівняно з малою рамкою і може використовуватися в професійних радіосистемах. Прикладами антен з великою рамкою є петльовий вібратор, квадратні та дискові антени, а також дельта-петльова антена. Остання має трикутну форму і завдяки своїй геометрії забезпечує гарну спрямованість і стабільність;

3. щілинні антени: належать до класу закритих антенних конструкцій, в яких основними елементами випромінювання є щілини, вирізані в провідній поверхні. Такі антени широко використовуються завдяки своїй механічній міцності, компактності та здатності забезпечувати задану діаграму спрямованості при малих габаритах. Щілини можуть бути різної форми, але найпоширенішими є лінійні щілини, розміщені на плоских або циліндричних поверхнях. Використовуються також хрестоподібні щілини, які, наприклад, характерні для дискових щілинних антен. Довжина щілин зазвичай становить від половини до повної довжини хвилі ($\lambda/2 - \lambda$), що забезпечує ефективне резонансне випромінювання. Особливістю щілинних антен є те, що вони працюють за принципом подвійності з дипольними антенами: електричне поле в щілині подібне до поля навколо провідника в диполі, а напрямок випромінювання визначається орієнтацією щілини і типом збудження. Завдяки своїм характеристикам щілинні антени широко використовуються в авіаційній техніці, радіолокаційних системах, морському зв'язку та інших галузях, де важливі компактність, надійність і спрямованість;

4. активні антени: це антенні системи, які поєднують пасивний випромінювальний елемент (наприклад, вібратор або монополь) з інтегрованим активним електронним компонентом, зазвичай підсилювачем сигналу. Така інтеграція створює компактну, чутливу і широкосмугову антену, яка ефективно працює в умовах слабких або «зашумлених» сигналів. Завдяки вбудованому підсилювачу активні антени можуть значно покращити якість прийому, особливо в коротко- та середньохвильовому діапазонах. Водночас вони мають певні обмеження, зокрема, активні антени не є лінійними пристроями і не дотримуються принципу взаємності, а це означає, що їхні параметри прийому і передачі можуть суттєво відрізнятись. Найчастіше активні антени застосовуються у вигляді активних приймальних антен, які використовуються в радіоприймачах, мобільних пристроях, телевізійних системах, аналітичному обладнанні та інших пристроях, що вимагають високої чутливості при мінімальних розмірах;
5. групові антени, або групові випромінювачі: формуються з декількох окремих випромінюючих елементів, які діють узгоджено як єдина система. Основні властивості випромінювання таких антен визначаються геометричним розташуванням окремих елементів і режимом їх живлення, зокрема, фазовими та амплітудними характеристиками. Однією з головних переваг групових антен є можливість електронного керування напрямком головного променя шляхом зміни фази сигналів, що приймаються окремими випромінювачами. Це явище називається електронним скануванням простору, і воно характерне для антен з фазовою модуляцією. Гнучкість конструкції дозволяє використовувати в антені довільну кількість випромінювачів, що дає можливість реалізувати практично будь-який бажаний просторовий розподіл випромінювання. За конфігурацією групові антени поділяються на кілька типів:
 - 5.1 Лінійні - випромінювачі розташовані на одній прямій лінії, утворюючи одновимірну структуру. Цей тип простий в реалізації і широко використовується на практиці.

5.2 Площинні - елементи розміщуються в одній площині, часто перед металевим рефлектором. Типові конфігурації - 2×2 , 4×4 і т.д., які дозволяють отримати високу спрямованість у двох координатах.

5.3 Просторові (об'ємні) - характеризуються тривимірним розташуванням випромінювачів. Прикладами є кільцеві системи, конформні антени та складні багатовимірні решітки для спеціалізованих застосувань (наприклад, супутниковий або радіолокаційний зв'язок).

5.4 Антени з живленням від мережі, які використовують дві системи: матрична - наприклад, матриця Батлера, яка дозволяє формувати кілька незалежних діаграм спрямованості одночасно на одній частоті; адаптивні - в таких антенах основний промінь і нульові точки можна змінювати в реальному часі, регулюючи фази і амплітуди. Це дозволяє автоматично адаптуватися до перешкод або змін у навколишньому середовищі антени з живленням від мережі, які використовують спеціальні схеми розподілу сигналу, що задають фазу та амплітуду для кожного елемента;

Випромінювальні елементи, з яких складаються антени, можуть мати різну геометрію залежно від застосування, частотного діапазону, просторових обмежень і вимог до діаграми спрямованості. Загалом, всі випромінюючі структури поділяються на два основних типи: плоскі та просторові.

До плоских хвиль відносяться:

- Прямолінійні конструкції - елементи розташовані вздовж прямої лінії. Прикладом може служити логоперіодична вібраторна антена або монопольна логоперіодична антена;
- зігнуті конструкції - мають V-подібну геометрію. Прикладом може служити V-подібна логоперіодична антена, яка дозволяє зменшити розмір без втрати ефективності;
- Складені конструкції - елементи мають форму меандру або зигзага. Такі антени мають менші габарити, але можуть підтримувати широкий діапазон частот.

- Структури з вигинами - прикладом може слугувати логоперіодична антена з петлею Ландшторфера, яка має спеціальні вигини для оптимізації коефіцієнта підсилення в певному напрямку;
 - Закручені, приклади - спіраль Архімеда, логарифмічна спіраль і спірально-щілинна антена, які поєднують компактність з широкосмуговою і стабільною поляризацією.
 - площинні структури характеризуються плоским виконанням всіх елементів (логоперіодична планарна антена);
До просторових хвиль відносяться:
 - структури зі зломом — конструкції, що складаються з двох логоперіодичних антен, з'єднаних передніми краями;
 - циліндричні спіральні антени — антени, у яких елементи намотані по поверхні циліндра;
 - Конічні спіральні антени — антени із спіраллю, намотаною вздовж коніної поверхні.
6. Апертурні випромінювачі: тип антен, в яких випромінювання генерується через відкриту поверхню, що називається апертурою. Діаграма спрямованості таких антен визначається розміром, формою і розподілом електромагнітного поля на її поверхні. До цього класу також належать антени, здатні випромінювати вищі гармоніки. Апертурні антени поділяються на кілька основних типів:
- 6.1 дзеркальні антени (рефлекторні антени). Випромінювання, що падає на дзеркальну поверхню, відбивається з мінімальними втратами;
 - 6.2 рупорні антени, електромагнітна енергія, що надходить у хвилевід, випромінюється через його відкритий кінець. До рупорних антен відносяться:
1. порожнисті провідникові антени - відкритий циліндричний або квадратний трубчастий провідник виконує роль випромінювача;

2. рупорні випромінювачі - розширена воронкоподібна частина хвилеводу (рупор) підвищує ефективність випромінювання. Прикладами є Е-площинні, Н-площинні секторні рупори, пірамідальні та конічні рупори.
- 6.3 лінзові антени, вони використовують спеціальні лінзи для корекції фазового фронту хвиль: прискорюють або уповільнюють хвилі в певних напрямках для формування заданої діаграми спрямованості;
- 6.4 діелектричні антени, вони працюють на основі поверхневої хвильової провідності.
Існує два основних типи:
 1. короткі антени, які діють подібно до лінз ближнього поля;
 2. довгі антени, які мають різну конструкцію: стрижневі антени, трубчасті антени (циліндричні трубки), ступінчасті стрижні (зі змінною товщиною), пластинчасті антени (зі ступінчастою зміною товщини пластини).
- 6.5 антени розсіяних хвиль: випромінювання генерується через отвори у хвилеводі, розташовані через рівні або змінні інтервали. Прикладами є: коаксіальні випромінюючі лінії, поздовжні щілини в хвилеводах, поперечні щілини в прямокутних хвилеводах, антени поверхневих хвиль. [10]