

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ
КАФЕДРА СИСТЕМ ІНФОРМАЦІЙНОГО
ТА КІБЕРНЕТИЧНОГО ЗАХИСТУ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження роботи планарної антени
пеленгаційного поста радіомоніторингу»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 125
Кібербезпека та захист інформації»
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Технічні системи інформаційного та кібернетичного
захисту

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання
на відповідне джерело.*

_____ Ярослав ПІДЛІСНИЙ

Виконав: здобувач вищої освіти групи СЗДМ-61

_____ ПІДЛІСНИЙ Ярослав

Керівник: _____ ПЕПА Юрій
к.т.н., доцент (ПРИЗВИЩЕ, Ім'я)

Рецензент: _____
к.т.н., доцент (ПРИЗВИЩЕ, Ім'я)

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ**

Кафедра Систем інформаційного та кібернетичного захисту
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність Кібербезпека та захист інформації
Освітньо-професійна програма Технічні системи інформаційного та кібернетичного захисту

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СІКЗ

Олександр ТУРОВСЬКИЙ

« » 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

ПІДЛІСНОМУ Ярославу Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Дослідження роботи планарної антени пеленгаційного поста радіомоніторингу».

Керівник кваліфікаційної роботи:

ПЕПА Юрій, к.т.н., доцент.

(ПРІЗВИЩЕ Ім'я, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджена наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від « » 2023 р. № .

2. Строк подання кваліфікаційної роботи:

15.12.2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

Аналіз можливостей виявлення БПЛА.

Оцінка ефективності активного і пасивного способів виявлення БПЛА.

Моделювання пеленгаційної антени.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Провести аналіз способів виявлення БПЛА.

2. Аналіз способів виявлення БПЛА.

3. Дослідження характеристик пеленгаційної антени і її моделювання для поста радіомоніторингу.

5. Перелік графічного матеріалу: Презентаційний матеріал на слайдах

6. Дата видачі завдання

15.10.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел		
2	Написання першого розділу роботи		
3	Написання другого розділу роботи		
4	Написання третього розділу роботи		
5	Написання висновків по роботі		
6	Підготовка демонстраційних матеріалів		
7	Підготовка доповіді		

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Ярослав ПІДЛІСНИЙ

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Юрій ПЕПА

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи містить: 73 стор., 42 рис., 3 табл. та 10 джерел.

Об'єкт дослідження — Процеси функціонування пеленгаційних антен у складі комплексів радіомоніторингу та радіопеленгації БПЛА.

Предмет дослідження — Пеленгаційна антена у складі комплексів радіомоніторингу та радіопеленгації БПЛА.

Мета роботи – розробка засобами комп'ютерного моделювання пеленгаційної антени діапазону ISM 2400 МГц для роботи у складі комплексів радіомоніторингу та радіопеленгації БПЛА.

Методи дослідження: аналітичні методи, методи порівнянь, математичні методи.

Наведені результати комп'ютерного моделювання пеленгаційної антени діапазону ISM 2400 МГц засобами САД.

Область застосування – комплекси радіомоніторингу та радіопеленгації БПЛА.

Ключові слова: БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ, АНТЕНИ РАДІОМОНІТОРИНГУ, ПЕЛЕНГАТОРНІ АНТЕНИ, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ АНТЕНИ.

ABSTRACT

The text part of the master's qualification work contains: 73 pages, 42 figures, 3 tables and 10 sources.

Object of research – processes of functioning of direction finding antennas as part of radio monitoring and radio direction finding systems of UAVs.

The subject of research – direction finding antenna as part of UAV radio monitoring and radio direction finding complexes.

Purpose – to develop by means of computer modeling a direction finding antenna of the ISM 2400 MHz band for operation as part of UAV radio monitoring and radio direction finding complexes.

Research methods: analytical methods, methods of comparison, mathematical methods.

The results of computer modeling of the direction finding antenna of the ISM 2400 MHz band by means of CAD are presented.

Scope – complexes of radio monitoring and radio direction finding of UAVs.

Keywords: UNMANNED AERIAL VEHICLES, RADIO MONITORING ANTENNAS, DIRECTION FINDING ANTENNAS, ANTENNA GAIN.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ВИЯВЛЕННЯ БПЛА.....	12
1.1 Поняття БПЛА.....	12
1.2 Протидія БПЛА.....	13
1.3 БПЛА як джерело загроз.....	21
1.4 Можливі канали виявлення БПЛА.....	23
1.5 Виявлення, класифікація і геолокація БПЛА методами пасивної локації та радіорозвідки.....	27
1.6 Активні і пасивні комплекси виявлення БПЛА.....	32
1.6.1 Станції радіорозвідки і постановки завад.....	32
1.6.2 Система пасивної локації БПЛА.....	37
Висновки до розділу 1.....	40
2 ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ПЕЛЕНГАЦІЇ БПЛА КОРЕЛЯЦІЙНИМ МЕТОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ КІЛЬЦЕВОЇ АНТЕНИ.....	41
2.1 Кореляційна обробка компонент поля з ФАР.....	41
2.2 Зони контролю пеленгатором небезпечних сигналів.....	44
Висновки до розділу 2.....	48
3 ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОЕЛЕМЕНТНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ РАДІОПЕЛЕНГАТОРА.....	49
3.1 Антена типу ІЛА.....	49
3.2 Антени типу ІФА.....	53
3.3. Моделювання ФАР на основі ІЛА.....	55
3.3.1 Завдання параметрів модельованої діелектричної структури.....	56
3.3.2 Створення топології антени ІЛА.....	58
3.3.3 Установка портів збудження антени ІЛА.....	64

3.3.4 Результати моделювання пеленгаційної антенної системи на основі ПЛА	65
Висновки до розділу 3.....	70
ВИСНОВКИ.....	72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЕ – антенний елемент

АР – антенна решітка

АС – антенна система

БПЛА – безпілотні літаючі апарати

ДН – діаграма направленості

ДРВ – джерело радіовипромінювання

КІ – кореляційний інтерферометр

КП – коефіцієнт підсилення антени

КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі

ШС – широкосмуговий

DF – Direction Finding (радіопеленгація)

DF – Direction Finder (радіопеленгатор)

UAV – Unmanned Aerial Vehicles (безпілотні літаючі апарати)

VSWR – voltage standing wave ratio (коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі)

ВСТУП

Безпілотні літаючі апарати (БПЛА) набули широкого поширення і застосування в багатьох областях людської діяльності. Вони можуть виконувати як цілу низку корисних функцій, але також при цьому можуть нести значну фізичну або інформаційну загрозу у військовій сфері, господарській діяльності чи приватному житті людей [1 - 4].

БПЛА можна успішно використовувати для доставки кореспонденції та вантажів. З їх допомогою можна проводити аеро фото- чи відео- зйомку поверхні, яка дозволяє виявляти порушення технічного стану об'єктів, складати карти ґрунтів, оцінювати ступінь вирубки лісових масивів і т.ін. Військові використовують БПЛА для виконання таких завдань, як розвідка місцевості, ретрансляція сигналів, ціле вказування для артилерії, постановка завад радіоелектронним засобам (РЕЗ) противника та ін.

У той же час поява і розвиток БПЛА значно розширило можливості правопорушників і організованих злочинних, терористичних груп і окремих осіб в організації нелегітимних дій спрямованих в області, організованої злочинності, транспортування і розповсюдження наркотиків, контрабанди, стеження за окремими людьми, фірмами і організаціями, несанкціонованим моніторингом об'єктів і територій державного значення (АЕС, закритих підприємств). Значні проблеми породжує неадекватну поведінку деяких власників БПЛА, що призводить, наприклад, до загроз повітряному транспорту в районах аеропортів (може привести до зіткнення БПЛА з літаками цивільної авіації при зльоті та посадці), іншим видам транспорту.

Специфічні властивості і переваги БПЛА - відносно невисока вартість, різноманітність виконуваних функцій, висока оперативність підготовки до застосування, економічність і простота в експлуатації, труднощі контролю призводять до підвищення безкарності і масовості протиправних дій з їх використанням.

Актуальною відповідно до цього є завдання отримання досить повної оперативної інформації про БПЛА за допомогою спеціальних технічних засобів і забезпечення високої швидкості та ефективності адекватних дій на виникаючі й існуючі виклики і загрози з їх використанням.

Сучасні БПЛА мають невеликі розміри, а значить низький рівень помітності: вони виготовляються з композитних матеріалів, мають малу ефективну поверхню розсіювання (ЕПР) в радіодіапазоні, їх двигуни не нагріваються до високої температури і випромінюють мало тепла (або можуть бути взагалі електричними), тому актуальним є напрямок по використанню їхнього власного акустичного шуму. Відповідно до цього виникають завдання виявлення, оцінки координат і параметрів руху (зокрема оцінки кутових координат - пеленга), а також розпізнавання класу БПЛА по їх радіо випромінюванню.

Сучасне обладнання радіомоніторингу та радіопеленгації повинне забезпечувати надійну та точну роздільну здатність на джерело радіовипромінювання (БПЛА) в його діапазонах робочих частот.

Сучасна антенна система (АС) радіопеленгатора складається з декількох антенних підсистем, зокрема пеленгаційні АС реалізовані як кільцеві антенні решітки (АР), які мають багатoelementну структуру, де для найбільш оптимального налаштування апертури антени під робочу смугу частот використовуються широкосмугові (ШС) антенні елементи або вузькосмугові зі змінюваною електричною довжиною (з реконфігурацією); для антени моніторингу переважно використовуються ШС антени. Антенні системи, що використовуються в апаратурі моніторингу БПЛА, повинні забезпечувати роботу в широкій смузі частот, забезпечувати прийом сигналів достатньо низького рівня для можливості подальшої їх обробки, та можливості забезпечення роздільної здатності з близькими кутовими координатами і в той же час мати прийнятні габарити і масу.

Магістерська робота присвячена комплексним дослідженням, пов'язаним з розробкою і проектуванням пеленгаційної антени діапазону ISM 2400 МГц у складі радіопеленгаційного комплексу БПЛА.

При виконанні роботи отримані такі результати:

- сформульовано завдання на проектування слабо спрямованої пеленгаторної антени;
- з використанням сучасних засобів САД проведено проектування пеленгаційної антени та моделювання її параметрів.

Зміст задач поставлених у магістерській роботі:

1. БПЛА: методи радіомоніторингу та радіопеленгації.
2. Огляд антенних систем у складі сучасних радіопеленгаторів БПЛА.
3. Оцінка можливості пеленгації міні-БПЛА кореляційним методом з використанням кільцевої антенної решітки.
4. Результати моделювання засобами САД характеристик пеленгаційної антени у складі комплексів радіомоніторингу та радіопеленгації БПЛА.

1 ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЮЧИХ АПАРАТІВ ПАСИВНИМИ ТА АКТИВНИМИ ЗАСОБАМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

1.1 Поняття БПЛА

Під БПЛА слід розуміти літаючі апарати разового або багаторазового застосування, виконані за схемою літака або гелікоптера без екіпажу на їх борту, призначені для керованих або некерованих польотів.

Безпілотні авіаційні комплекси і системи знаходять широке застосування як у військовій, так і в цивільній сферах. Зазвичай вони включають до свого складу:

- безпілотні літаючі апарати (UAV – Unmanned Aerial Vehicles);
- станції і пункти управління (наземні, морські і повітряні);
- засоби зв'язку;
- зльоту (запуску) і посадки;
- матеріально-технічного і інформаційного забезпечення.

Основними елементами безпілотних авіаційних комплексів і систем, які є засобами повітряного нападу і безпосередньо представляють повітряну небезпеку, є саме безпілотні літаючі апарати (БПЛА).

Розробка нових зразків БПЛА ведеться практично у всіх розвинених країнах. В даний час кількість створюваних БПЛА різних класів у всьому світі величезна, а їх розробка і виробництво розвивається шаленими темпами.

БПЛА важко класифікувати через відмінності характеристик, обумовлених надмірною кількістю конфігурацій і компонентів БПЛА. Поки не існує стандартів, що визначають типи пристроїв БПЛА і їх застосування.

Класифікація БПЛА можна провести, наприклад, за такими критеріями [2]:

- тип зльоту;

- цільове призначення;
- технічні характеристики;
- тип живлення силової установки;
- корисне навантаження;
- тип системи автоматизації;
- система запобігання зіткнень;
- тип навігації;
- тип захисту від глушіння сигналів;
- пропускна здатність радіочастотного каналу;
- бортова обробка даних;
- спеціалізація програмного забезпечення.

Все більш широке застосування при вирішенні задач спостереження за різними об'єктами знаходять малорозмірні БПЛА (МБПЛА), що відносяться до класу тактичних розвідувальних БПЛА. Вони характеризуються малими масою (до 500 кг) і габаритами (розмах крила до 10 м), ефективним комплексом бортового розвідувального обладнання, простотою і зручністю використання, низькою вартістю виготовлення і експлуатації [2].

1.2 Виявлення та протидія БПЛА військового призначення

До основних військових завдань, що покладаються на бойові МБПЛА, є:

- розвідка;
- спостереження;
- видача цільовказівки та коригування вогню систем зброї;
- охорона місць дислокації;
- забезпечення дій армійської авіації в ході вогневої підтримки наземних частин;
- ретрансляція сигналів зв'язку;

- нейтралізація засобів телекомунікацій та РЕЗ різного призначення шляхом використання спрямованого (потужного) електромагнітного випромінювання або постановки радіозавад з зони дії БПЛА.

Крім того, одним з перспективних напрямків є використання МБПЛА в складі пошуково-рятувальних робіт при бойовому застосуванні.

Загальними вимогами до бойових МБПЛА всіх рівнів управління є їх багатофункціональність - можливість виконання завдань розвідки, спостереження і видачі цілевказівок для застосування зброї як на відкритій місцевості, так і при веденні бойових дій в населених пунктах, а також відносно невисока вартість виробництва і експлуатації.

Можна навести приклади таких зразків МБПЛА (див. рис. 1.1-1.7) [2]:

- тактичні міні-БПЛА поля бою (що відповідають 1 і 2 класам БПЛА перспективної бойової системи СВ США (FCS), які за своїми габаритами є БПЛА масою до 30 кг з тривалістю польоту до 2 годин; до них можна віднести такі зразки:

- RQ-11B «Raven» (США);
- «Bird Eye-400» (Ізраїль);
- AR180-B «Air Robot» (Німеччина);

- тактичні розвідувальні і багатоцільові БПЛА малої дальності, що відповідають 3 і 4 класам БПЛА перспективної бойової системи СВ США (FCS), практичний дах яких не перевищує 6 км, радіус дії до 250 км, тривалість польоту до 10 годин; до них можна віднести такі зразки:

- RQ-7 «Shadow-200» (США);
- «Searcher MKII» (Ізраїль);
- UAV «Phoenix » (Великобританія);
- комерційні БПЛА типу «Phantom» (США).

Малорозмірні БПЛА можуть використовуватися як в ході бойових дій, так і в період завчасної і безпосередньої їх підготовки спільно з іншими силами і засобами розвідки в інтересах усіх видів збройних сил. У період

завчасної підготовки бойових дій МБПЛА можуть здійснювати польоти вздовж державного кордону.

Основним способом застосування МБПЛА є розвідувальний політ. Залежно від поставлених перед МБПЛА завдань, розвідувальні польоти можуть бути регулярними, епізодичними і однократними.



Рисунок 1.1 – Тактичний міні-БПЛА поля бою типу RQ-11B «Raven» (США)



Рисунок 1.2 – Тактичний міні-БПЛА поля бою типу
«Bird Eye-400» (Ізраїль)



Рисунок 1.3 – Тактичний міні-БПЛА типу
AR100-B «Air Robot» (Німеччина)



Рисунок 1.4 – Тактичний розвідувальний БПЛА багаточільового призначення типу RQ-7 «Shadow-200» (США)



Рисунок 1.5 – Тактичний розвідувальний БПЛА багаточільового призначення типу «Searcher MKII» (Ізраїль)



Рисунок 1.6 – Тактичний розвідувальний БПЛА багатоцільового призначення типу «Phoenix» (Великобританія)

Регулярні польоти МБПЛА бойового призначення можуть здійснюватися протягом всього часу безпосередньої підготовки до бойових дій. При цьому можливо періодичне вторгнення МБПЛА в повітряний простір, що охороняється, в тому числі в зони бойових дій [2].



Рисунок 1.7 – Комерційний БПЛА типу «Phantom» (США)

Польоти МБПЛА здійснюються зі змінним профілем на середніх і малих висотах з максимальною швидкістю і з задалегідь програмованим маневром з метою ведення повітряної розвідки і передачі розвідувальних даних на наземні центри управління в реальному масштабі часу, коригування вогню, лазерного цілевказування і наведення, контролю результатів вогневих, ракетних і авіаційних ударів.

Слід зазначити, що боротьба з МБПЛА із застосуванням вогневих засобів недостатньо ефективна через малу радіолокаційну і оптичну помітності МБПЛА, низькою висотою і малими швидкостями їх польоту, слабкою передбачуваністю траєкторій польоту [2].

Крім того, застосування ЗУР і зенітної артилерії не завжди виправдано з точки зору економічної доцільності через занадто високу вартість боєприпасів щодо вартості МБПЛА, а також не завжди можливо в умовах мирного часу.

Під протидією МБПЛА військового і цивільного призначення засобами РЕБ розуміється комплекс узгоджених за способом, місцем і часом дій організаційних, технічних і спеціальних заходів, спрямованих на радіоелектронне ураження МБПЛА, що призводить до порушення їх штатного функціонування і зриву виконання поставлених завдань.

Засоби РЕБ здатні здійснювати радіоелектронне ураження МБПЛА, що приводить до зриву процесу нормального функціонування БПЛА шляхом незворотного виведення з ладу функціональних значущих для МБПЛА елементів або систем (функціональне ураження) засобами радіочастотного зброї або шляхом радіоелектронного придушення станціями радіоперешкод при збереженні фізичної цілісності МБПЛА.

Задачі засобів РЕБ з протидії МБПЛА визначаються виходячи з [2]:

- особливостей об'єктів прикриття засобами РЕБ;
- тактико-технічних характеристик (ТТХ), тактики застосування (особливостей застосування) і вирішуваних задач МБПЛА у воєнний (мирний) час;

- особливостей МБПЛА як об'єктів РЕБ.

Завдання засобів РЕБ з протидії МБПЛА в мирний час, в період безпосередньої загрози агресії і в воєнний час будуть близькі за змістом і включають [2]:

- виявлення МБПЛА засобами радіолокаційної, радіотехнічної, радіо-електронної і оптико-електронної розвідок;
- недопущення польотів МБПЛА над об'єктами ЗС;
- прикриття об'єктів ЗС від виявлення бортовими засобами розвідки МБПЛА;
- унеможливлення використання МБПЛА навігаційної інформації;
- унеможливлення управління МБПЛА і передачі розвідувальної інформації на наземні пункти управління.

Об'єктами радіоелектронного ураження засобами РЕБ при протидії МБПЛА є [2]:

- приймальні пристрої бортових терміналів управління і передачі даних по радіоканалах у межах прямої видимості;
- бортові приймальні пристрої апаратури глобальних навігаційних супутникових систем;
- бортова апаратура радіоелектронної, оптико-електронної розвідки і цілевказівки;
- система управління бортовим обладнанням (бортовий комп'ютер);
- приймальні пристрої наземних терміналів управління і передачі даних.

Аналіз розробок показує, що країни-виробники МБПЛА ведуть широкомасштабні дослідження і в області створення засобів протидії МБПЛА. При цьому розглядаються як засоби формування радіоелектронних перешкод, так і кошти спрямованої енергії.

Наприклад, засоби нейтралізації МБПЛА спрямованим електромагнітним випромінюванням можна розглядати як комплексну систему оборони від БПЛА (Anti-UAV Defence System – AUDDS), яку

розробляють такі компанії як Blighter Surveillance Systems; Chess Dynamics і Enterprise Control Systems (Великобританія) [2].

Такі системи здатні виявляти, відстежувати і ідентифікувати цілі, а в разі необхідності нейтралізувати їх з використанням потужного спрямованого електромагнітного випромінювання. Вони також можуть порушувати управління БПЛА, що в кінцевому результаті змушує його перервати виконання завдання. В таких системах об'єднані РЛС виявлення МБПЛА, оптико-електронні прилади спостереження за ним і засоби спрямованого радіочастотного впливу для виведення з ладу або нейтралізації роботи МБПЛА. Дальність дії таких систем при використанні всього комплексу для виявлення, спостереження та ідентифікації міні-БПЛА становить 8 км, а для мікро-БПЛА - до 2 км. Дальність дії системи для нейтралізації БПЛА становить 2,5 км.

Прикладом комплексного підходу протидії МБПЛА лазерними засобами є лазерна гармата, розроблена фірмою MBDA (Німеччина) в рамках програми C-RAM Counter Rocket Artillery Mortar [2]. Вже проведено кілька успішних «стрільб» з такої лазерної гармати, призначеної для перехоплення керованих і некерованих ракет, артилерійських снарядів, мінометних мін і БПЛА. Вперше промінь потужністю 10 кВт був наведений і протягом декількох секунд утримувався на рухомій мішені, розташованій на відстані більше 2 км. Це випробування підтвердило здатність системи лазерного наведення C-RAM компанії MBDA супроводжувати рухомі об'єкти на відстані 2300 м і висоті 1000 м в реальних умовах [2].

1.3 Цивільні БПЛА як джерело загроз

Поява комерційних БПЛА привертає увагу споживачів завдяки безлічі різних сценаріїв застосування таких засобів - від відеозйомки і контролю посівів до створення інфраструктури доставки товарів,

виконання пошуково-рятувальних робіт і обмежується хіба що нашою фантазією.

Проте фантазії людей можуть бути спрямовані на виконання деяких специфічних задач, що перекочували зі сфери БПЛА мілітарного призначення і зараз покладені на МБПЛА цивільного призначення, зокрема [3]

- комерційна розвідка;
- спостереження;
- ретрансляція сигналів зв'язку;
- постановки радіозавад та придушення засобів телекомунікацій та РЕЗ різного призначення з зоні дії БПЛА (GPS-сигналів або Wi-Fi).

Так, за даними Федерального управління цивільної авіації США (FAA) [3], з початку грудня 2016 року по кінець травня 2017 року було зафіксовано близько 600 інцидентів, пов'язаних з БПЛА. Керовані цивільними особами БПЛА створюють чимало проблем. Серед недавніх подій можна згадати посадку БПЛА біля Білого дому, зіткнення БПЛА з літаком British Airway в аеропорту Хітроу при посадці і т. д. У цих випадках загроз не виникло, але в майбутньому може бути по-іншому: такі БПЛА можуть нести вибухові речовини, біологічну або хімічну зброю для вчинення терористичних актів. Пристрої також можна використовувати для транспортування контрабанди, наркотиків, глушіння GPS-сигналів або Wi-Fi, що призведе до переривання зв'язку і передачі даних.

За даними IC Insights, з урахуванням всіх потенційних сфер використання світовий обсяг продажів пристроїв БПЛА в 2025 році може перевищити 10 млрд. дол.

З урахуванням цих та інших загроз дослідницька організація ASD вбачає також розвиток ринку систем протидії БПЛА, що в 2022 році може скласти близько 16 млрд. дол. (див. рис.1.8) [3]. Таким чином, на той час витрати на системи виявлення, визначення місця розташування і

нейтралізації БПЛА перевищать очікуваний рівень доходів від їх продажу в 2025 році.

Не випадково сьогодні актуальними завданнями є проектування систем виявлення місця розташування БПЛА, розробка заходів та засобів щодо зниження виникаючих загроз.

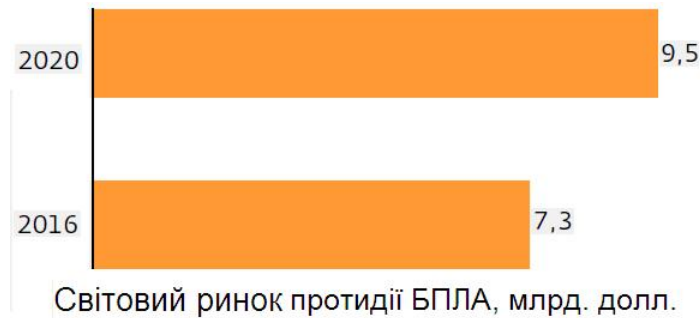


Рисунок 1.8 – Ринок систем протидії БПЛА

1.4 Можливі канали виявлення БПЛА

Інформація для виявлення і подальшої пеленгації БПЛА може бути отримана шляхом прийому спеціальними засобами відбитої і випромінюваної енергії у всіх діапазонах спектру електромагнітних і акустичних хвиль.

Будь-якому матеріальному об'єкту, в тому числі і БПЛА, притаманні демаскуючі ознаки, які виділяють його в навколишньому середовищі, роблячи його помітним для спостереження.

В даний час ступінь помітності визначають значенням його сигнатур [1]:

- в радіочастотному спектрі;
- в інфрачервоному (ІК) спектрі;
- в спектрі видимого світла;
- в акустичному спектрі.

Сучасні легкі БПЛА мають сигнатури невеликої ваги: їх виготовляють з використанням композитних матеріалів і пластика зі спеціальним забарвленням і особливою комбінацією шарів; невеликі

бензинові або електричні двигуни випромінюють мало тепла і працюють майже безшумно.

Значна різноманітність можливих варіантів побудови і використання засобів спостереження в кожному з зазначених діапазонів обумовлює труднощі оцінювання їх ефективності.

Акустичний канал. Сумарний спектр акустичного випромінювання тактичного БПЛА обумовлений гармонічними і широкосмуговими складовими. Він включає в себе гармонічні складові залишку випромінювання двигуна, шуму обертів гвинта, випромінювання механічної природи, а також високочастотну і низькочастотну складові шуму двигуна з безперервними по частоті спектрами. В шумі силової установки БПЛА, яка складається з поршневого двигуна повітряного охолодження, при відсутності в його вихлопному тракті глушника визначальним джерелом зовнішнього шуму є поршковий двигун.

Оптичний канал. Оптичне виявлення БПЛА дуже залежить від навколишнього середовища. Збільшення дальності виявлення досягається за рахунок звуження поля зору, зменшення зони огляду і збільшення часу пошуку. Тому візуальні сенсори є неефективними пристроями для проведення пошуку. При надходженні зовнішніх цілевказників від більш ефективного пошукового засобу оптичні сенсори можуть бути ефективно використані для супроводу БПЛА. Оскільки БПЛА є значно меншими за розмірами в порівнянні з пілотованими засобами, то це ускладнює їх виявлення за допомогою оптичних засобів. Порівняно з літаком контрастність БПЛА по відношенню до фону є меншою через відсутність світлових маяків, зменшений факел малого двигуна і меншу поверхню відбиття.

ІЧ канал. Тепло від БПЛА виділяється, в основному, силовою установкою і, в меншій мірі, електронними компонентами, а також точками гальмування на несучих краях крил, пропелерів і гвинтів. Розробники БПЛА намагаються попередити випромінювання в ІЧ

діапазоні в напрямку розміщених на землі приймачів і направити це випромінювання в бік неба. Крім того, використовують матеріали з малою випромінювальною здатністю, такі як срібло і алюміній. В даному випадку можливість БПЛА бути виявленим визначається його випромінювальною здатністю, контрастом і площею випромінювання.

Радіоканал. Пошук БПЛА за допомогою активних радіолокаційних станцій досить продуктивний, так як вони мають відносно великий імпульсний обсяг пошуку і значну дальність виявлення. Однак РЛС можуть бути виявлені противником по власному випромінюванню. Радіолокаційне виявлення БПЛА може бути прийнятним тільки тоді, коли не ставляться вимоги до скритності роботи або високої мобільності. Як уже зазначалося, більшість БПЛА виготовляють з композитних матеріалів, які досить погано відбивають електромагнітні хвилі. Радіохвилі проникають через поверхню БПЛА і тільки частково відбиваються від неї.

Канал радіорозвідки. БПЛА можуть бути виявленими засобами радіотехнічної розвідки шляхом прийому і аналізу радіосигналів ліній зв'язку та управління, радіолокаційних висотомірів, постановників активних перешкод і радіолокаційних станцій. Цим методом можна встановити напрямок на БПЛА. Точність визначення підвищується при збільшенні часу спостереження. Деякі НЧ лінії зв'язку можуть бути виявлені на значних відстанях. Випромінювання бортових РЛС і постановка активних завад БПЛА можуть бути виявлені на ще більших відстанях. Цей метод вимагає мінімального обладнання та дозволяє швидко визначити пеленг цілі при подальшій видачі цілевказівок на засоби оптичного або ІЧ спостереження.

Перспективним напрямком надійного виявлення БПЛА є комплексування інформації, яка надходить по каналах різної фізичної природи.

Відрізнити БПЛА від інших літаючих апаратів непросто, що пояснюється наступними факторами [3]:

- віртуальне і звукове виявлення утруднено через помилки, що вносяться умовами навколишнього середовища і призводять до погіршення продуктивності системи виявлення БПЛА;

- радари можуть не виявити БПЛА малих розмірів;

- електрооптичні датчики виявляються неефективними в несприятливих погодних умовах (дощ або туман).

Радіочастотне виявлення БПЛА, навіть якщо його дані попередньо запрограмовані в системі (з використанням дискретних GPS проміжних точок польоту), також може виявитися неефективним при використанні тільки однієї системи. Засоби радіочастотного виявлення як одні з ключових елементів систем виявлення цивільних БПЛА мають переваги перед іншими технологіями в швидкості виявлення.

До систем радіочастотного виявлення висуваються спеціальні вимоги: високий рівень чутливості, наявність можливості раннього виявлення і мінімізація помилкового спрацьовування.

Подібні радіочастотні установки можуть бути важливою ланкою повного інтегрованого технологічного циклу системи, що використовує і інші сенсорні технології (рис. 1.9) [3].

Оцінюючи переваги і недоліки розглянутих фізичних каналів виявлення БПЛА, можна зробити висновок, що для виявлення малорозмірних і мало швидкісних БПЛА (мікро-БПЛА), так званих БПЛА широкого застосування, що є найбільш затребуваними в рішенні цивільних і військових завдань, оптимальним є поєднання методів пасивної локації та радіорозвідки.



Рисунок 1.9 – Основні функції систем виявлення і визначення місця розташування БПЛА

1.5 Виявлення, класифікація і геолокація БПЛА методами пасивної локації та радіорозвідки

Більша частина операцій радіоуправління БПЛА здійснюється в неліцензованому ISM діапазоні смуг частот 2,4 ГГц або 5,8 ГГц, однак використовуються і інші смуги частот, включаючи 433 МГц і 4,3 ГГц. Радіокерування БПЛА зазвичай здійснюється в одному з трьох діапазонів радіо частот (RF), закріплених за пристроями з дистанційним керуванням (див. табл. 1.1.) [3].

Крім того, іноді радіокеровані пристрої працюють на частотах, які використовувалися раніше, наприклад, 27; 35; 40,68 і 72 МГц, діапазон управління на цих частотах становить до кількох кілометрів.

Ці діапазони частот можуть бути переповнені - особливо ISM 2,4 ГГц, в якому працює більшість систем Wi-Fi, Bluetooth і IoT (ZigBee, Z-Wave, LoRa і т.д.). Сигнали в цих смугах частот вільно регулюються з використанням правил вільного доступу. Якщо ISM 2,4 ГГц зараз значно завантажений, то смуги SRD1 і ISM 5,8 ГГц поки відносно вільні. Однак з часом вони також можуть стати більш популярними, а значить більш завантаженими.

Таблиця 1.1 – Стандартні смуги частот радіокерованих БПЛА

Визначення смуги частот	Початок смуги частот	Кінець смуги частот	Максимальне значення потужності
УВЧ	433,05 МГц	434,79 МГц	≤10 мВт ERP*
2,4 ГГц ISM	2,4 ГГц	2,4835 ГГц	≤100 мВт EIRP**
5,8 ГГц ISM	5,725 ГГц	5,85 ГГц	≤100 мВт EIRP

З метою контролю можливих загроз (можливість виявлення та відстеження) системи повинні бути забезпечені широкосмуговою антеною і прийомним блоком, які здатні контролювати всі критичні смуги частот. Крім того, оскільки ці ISM смуги і працюючі в них пристрої відрізняються низькою потужністю (~100 мВт), а неавторизовані користувачі діють одночасно з авторизованими, використовуючи схожі технології (на зразок WLAN), то для дистанційного виявлення сигналів важлива висока чутливість системи автоматичного виявлення.

Треба відзначити, що розділити користувачів на авторизованих та неавторизованих (несучих загрози) може тільки досвідчений оператор. Наприклад, щоб виявити БПЛА, в якому використовуються технології широкосмугових псевдовипадкових сигналів і стрибкоподібної перебудови робочих частот (FHSS - frequency hopping spread spectrum), яка працює в смузі ISM 2,4 ГГц, система захисту повинна здійснювати моніторинг за всіма чотирма виділеними каналами протягом деякого часу за різними параметрами. Об'єднаний аналіз усіх параметрів дозволяє виявити сигнал, який перескакує з одного каналу на інший, його тривалість, послідовність переходу між каналами і швидкість стрибків в секунду. Це дозволить визначити характерні особливості БПЛА (дрона) з FHSS і згодом легко його розпізнати.

Коли середовище спостереження заповнене користувачами, які застосовують різні технології (множинні точки доступу WLAN і призначені для користувача термінали, технології Bluetooth і IoT), БПЛА з FHSS може загубитися з поля зору. Крім того, в деяких БПЛА для управління використовуються сигнали WLAN або низхідна лінія передачі відео. У цих умовах для виявлення БПЛА і його руху необхідно забезпечити більш детальний контроль і розшифровку сигналів WLAN.

Фахівці Keysight Technologies вважають, що для підвищення швидкодії та ефективності системи захисту можна контролювати не весь спектр, а тільки ті смуги частот, які використовуються для управління БПЛА. При цьому кожен з них можна конфігурувати по роздільній здатності (по смузі пропускання), що визначає розмір біна (несучого каналу) при швидкому перетворенні Фур'є (найменша частота, яку можна розрізнити) [3].

Крім конфігурації або одночасно з ним можна застосовувати схеми усередненого відстеження на основі стандартних смуг пропускання і характеристик сигналів управління БПЛА.

Наприклад, ширина керуючих сигналів БПЛА в діапазоні SRD 400 МГц становить зазвичай десятки кілогерц. У цьому випадку застосовується вузька RBW (менше 3 кГц). У ISM 2,4 ГГц і діапазоні 5,8 ГГц ширина керуючого сигналу БПЛА становить 1-2 МГц. В цьому випадку вигідно використовувати більш широкий RBW (20 кГц). Така ширина RBW дозволяє прискорити обробку спектра і підвищити можливість переривання передачі сигналу радіоуправління БПЛА.

Для надійного виявлення сигналу БПЛА велике значення має автоматична класифікація - від оператора важко очікувати, що він зможе зрозуміти і оцінити всі сигнали у всіх діапазонах частот одночасно. Проста система сигналізації на основі порога розрізнення радіосигналу, наявна в багатьох основних системах моніторингу спектра, може привести до помилкової тривоги при виявленні цього порога. Автоматична система

класифікації повинна розпізнавати обстановку і бути здатною знаходити систему передачі для класифікації характерних ознак (сигнатур) очікуваної загрози по бібліотеці відомих сигналів дронів. Великою перевагою радіочастотної системи виявлення під час встановлення зв'язку є мінімальна тривалість процесу встановлення зв'язку, що покращує ситуаційну обізнаність.

Один з надійних методів автоматичного виявлення сигналу БПЛА - виявлення щодо мінімального рівня шуму. Спочатку метод був розроблений фірмою Keysight Technologies для ВЧ-діапазону (2-32 МГц). Його алгоритм містить кілька змінних, які стосуються кордонів робочого режиму, сегментації і згладжування. При правильному налаштуванні змінних автоматичне визначення порогу може "скакати" вгору і вниз по активним Wi-Fi-каналах, при цьому правильно відхиляючись і виділяючи керуючі сигнали БПЛА з фону інших сигналів.

Фахівці Rohde & Schwarz, розглядаючи ситуацію присутності в спостережуваному районі великого числа БПЛА, припустили можливі ситуації появи "дружніх" БПЛА (так званий "білий аркуш"), які здійснюють моніторинг периметра, що беруть участь, наприклад, в поліцейському розслідуванні або спостерігають за скупченням людей [3]. Знання індивідуальних ідентифікаційних даних відомих або "дружніх" сигналів дає можливість оцінити, де небезпечні БПЛА ("чорний список") співіснують у часі та просторі з БПЛА з "білого списку". У свою чергу це дозволяє визначити число можливих загроз в охоронюваному районі.

Разом з тим, слабким місцем БПЛА є вразливість його каналів зв'язку. Сигнали GPS навігаторів, як і будь-які сигнали, що приймаються і відсилаються БПЛА, можна глушити, перехоплювати і підміняти шляхом перехоплення управління (spoofing). Подібні методики дозволяють перехопити БПЛА і посадити його в потрібному місці.

Так, кілька років тому Іран перехопив і посадив надсекретний БПЛА RQ-170 "Sentinel" (рис. 1.10) компанії Lockheed Martin із застосуванням

технології Stealth за принципом літаюче крило розмахом близько 20 м, виготовлений на замовлення ЦРУ США («R» в назві означає, що він призначений для розвідки (Reconnaissance)). Іран відмовився віддати його і створив на його основі власні бойові БПЛА [3].



Рисунок 1.10 – БПЛА для розвідки RQ-170 Sentinel компанії Lockheed Martin

У 2012 році вченими з Техаського університету (Остін, штат Техас) була доведена можливість злому і перехоплення управління БПЛА шляхом імітації GPS з'єднання (GPS spoofing), але тільки для тих апаратів, які використовують незашифрований цивільний сигнал GPS [3].

Відповідно, створення і застосування систем перехоплення управління і посадки/знищення цивільних БПЛА цілком здійсненне завдання. Роботи в цьому напрямку активно ведуться різними країнами, починаючи десь з 2010 року.

1.6 Активні і пасивні комплекси виявлення БПЛА

1.6.1 Станції радіорозвідки і постановки завад ARDRONIS компанії «Rohde & Schwarz»

Як приклад розробки засобів радіоелектронного придушення БПЛА можна навести приклад станції радіорозвідки і постановки завад ARDRONIS фірми «Rohde & Schwarz», (Німеччина) [5]. Одним із прикладів пасивної і активної системи виявлення, ідентифікації, визначення місця розташування БПЛА і оператора, а також протидія БПЛА є система R&S ARDRONIS запропонована компанією Rohde & Schwarz (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Портативна система R&S ARDRONIS-D об'єднує функції виявлення, класифікації та визначення місця розташування

Ця станція забезпечує автоматичний пошук, виявлення, класифікацію та пеленгування малорозмірних БПЛА за сигналами їх бортових радіопередавачів, які працюють в діапазоні частот 400–5800 МГц, і постановку перешкод їх каналам управління (телеметрії) і передачі даних. Її перевагами є можливість в будь-який час доби і в складних метеоумовах раннього виявлення БПЛА перед зльотом (при включенні бортовий

радіопередавачів) та їх операторів, що забезпечує більш швидке реагування і вибір заходів протидії.

Управління станцією ARDRONIS здійснюється від переносного ПК за допомогою спеціального програмного забезпечення віддаленого управління, що має простий і зручний інтерфейс користувача. В його пам'яті зберігається база даних сигнатур сигналів радіоліній управління БПЛА для автоматичного детектування, ідентифікації та попередження, а також електронні карти місцевості для відображення на їх фоні напрямків пеленгування на джерело радіовипромінювання. Випробування станції підтвердили її можливість в автоматичному режимі ефективно виявляти і порушувати управління мікро- і міні-БПЛА на дальності до 1 км. Станція може використовуватися в мобільному (переносному) і стаціонарному варіантах.

Система автоматичного виявлення і придушення БПЛА R&S ARDRONIS має 4 типи комплектації:

- R&S ARDRONIS-I;
- R&S ARDRONIS-D;
- R&S ARDRONIS-R;
- R&S ARDRONIS-P.

Системи R&S ARDRONIS-I і R&S ARDRONIS-D працюють в пасивному режимі, а R&S ARDRONIS-R і R&S ARDRONIS-P – також в активному режимі.

Система R&S ARDRONIS-I (рис. 1.12) забезпечує автоматичне виявлення і ідентифікацію БПЛА і складається з таких компонентів [5]:

- активна всенаправлена антена Rohde & Schwarz HE600 діапазону 20 МГц - 8 ГГц,
- вимірювальний приймач реального часу R&S EB500;
- джерело живлення для двох активних антен через сигнальний кабель R&S IN600;
- програмне забезпечення R&S ARDRONIS.

R&S® ARDRONIS Detection



Рисунок 1.12 – Система автоматичного виявлення і придушення БПЛА комплектації R&S ARDRONIS-I

Система R&S ARDRONIS-D (рис. 1.13) забезпечує автоматичне виявлення, ідентифікацію та визначення місця розташування БПЛА і оператора. Система R&S ARDRONIS-D складається з таких компонентів [5]:

- антени зі сверхразрешенієм R & S ADD078SR;
- ширококутового скануючого пеленгатора R & S DDF550;
- програмного забезпечення R & S ARDRONIS.

R&S® ARDRONIS Direction



Рисунок 1.13 – Система автоматичного виявлення і придушення БПЛА комплектації R&S ARDRONIS-D

Система R&S ARDRONIS-R (рис. 1.14) забезпечує автоматичне виявлення, ідентифікацію та протидію (постановку перешкод) БПЛА і складається з таких компонентів [5]:

- активної всенаправленої антени Rohde & Schwarz HE600 діапазону 20 МГц - 8 ГГц;
- всенаправленої пасивної антени 2.4 ГГц / 5.8 ГГц;
- джерела живлення для двох активних антен через сигнальний кабель R&S IN600;
- постановника перешкод R&S WSE;
- програмного забезпечення R&S ARDRONIS.



Рисунок 1.14 – Система автоматичного виявлення і придушення БПЛА комплектації R&S ARDRONIS-R

Система R&S ARDRONIS-P (рис. 1.15) забезпечує комплексну протидію загрозам від БПЛА: автоматичне виявлення, ідентифікацію, визначення місця розташування БПЛА і оператора і протидія (постановка перешкод) БПЛА. Система R&S ARDRONIS-P складається з таких компонентів [5]:

- антени зі сверхразрешенієм R & S ADD078SR;
- всенаправленої пасивної антени 2.4 ГГц / 5.8 ГГц;
- широкопугового скануючого пеленгатора R & S DDF550;
- постановника перешкод R & S WSE;
- програмного забезпечення R & S ARDRONIS.

R&S® ARDRONIS Protection

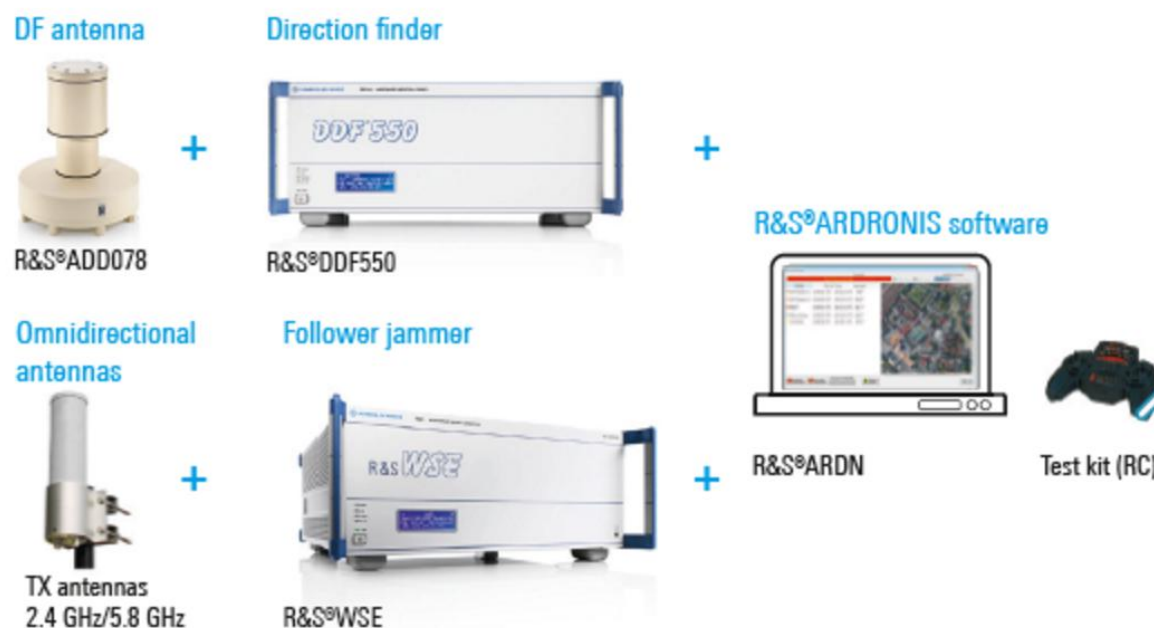


Рисунок 1.15 – Система автоматичного виявлення і придушення БПЛА комплектації R&S ARDRONIS-P

Автоматична система сімейства R&S ARDRONIS - комплексне рішення зі спеціалізованими можливостями виявлення, класифікації, визначення географічних координат, записи сигнатур і порушення лінії дистанційного управління БПЛА. В результаті успішних випробувань система R&S ARDRONIS була визнана ефективною з технічної точки зору.

Система R&S ARDRONIS забезпечує надійне виявлення і спостереження за активністю БПЛА, раннє попередження, орієнтування операторів у напрямку пошуку активних БПЛА і пультів дистанційного керування ними. Тобто у спецслужб з'являється можливість упіймати зловмисника на гарячому. Відповідно, можна вчасно розгорнути заходи протидії проникненню радіокерованих БПЛА в охоронювану зону за рахунок порушення лінії радіозв'язку.

Так, система R&S ARDRONIS була використана для захисту закритих об'єктів від несанкціонованого проникнення дистанційно керованих БПЛА при проведенні економічного саміту G7 в замку Ельмау

(Німеччина) і під час відвідування президентом США Б. Обамою промислового ярмарку в м. Ганновер в 2016 році.

1.6.2 Система пасивної локації БПЛА «Drone Detector» компанії «Aaronia»

Наступним прикладом (рис. 1.16) системи пасивної локації радіочастотного випромінювання від бортових систем БПЛА стала система "Drone Detector" від компанії Aaronia (Німеччина, Штрікшайд) [6].

Мета розробки - створення надійного методу виявлення невеликих БПЛА. Можливості виявлення РЧ-сигналу в реальному масштабі часу і методика запуску пошуку, здійснюваного комбінацією сигналів, забезпечують своєчасне попередження про появу в охороняється області будь-яких БПЛА або блоків управління ними. Система Drone Detector випускається як в мобільному, так і в стаціонарному виконанні.



Рисунок 1.16 – Система пасивної локації "Drone Detector" від компанії Aaronia

З метою зниження можливості перехоплення даних військових каналів зв'язку використовуються технології швидкої ППРЧ. В результаті лінії зв'язку БПЛА з апаратної точки зору є підсистемами, які можуть забезпечити скритність (невидимість, неможливість визначення) БПЛА. Однак для більшої частини цивільних БПЛА і їх блоків управління характерна обмежена дальність, а система Drone Detector має у своєму складі більш складні засоби прийому і працює на великій відстані, ніж оператори БПЛА.

Система пеленгування Drone Detector є пасивною, тобто не випромінює власних сигналів, здатних перешкодити роботі різних об'єктів (аеропортів і т.д.) аби попередити оператора БПЛА про свою присутність. Продуктивність системи не залежить від темряви або поганої погоди - якщо метеоумови дозволяють БПЛА літати, то вони будуть виявлені [6].

Пасивна система пеленгування "Drone Detector" оснащена двома 3D пеленгаційними антенними системами (рис. 1.17) [6]:

- 8-секторної 16-елементної антеною системою (IsoLOG 3D80);
- 8-секторної 24-елементної антеною системою (IsoLOG 3D80);
- 16-секторної з 32-елементної антеною системою (IsoLOG 3D160);
- 16-секторної з 48-елементної антеною системою (IsoLOG 3D160).

АС з 16 (32) антенами працюють в частотному діапазоні 400 МГц - 8 ГГц, а АС з 24 (48) 20 МГц - 8 ГГц. Крім того, з урахуванням модифікації вони можуть працювати в діапазонах частот від 9 кГц і до 20 ГГц. Таким чином, покриваються всі частоти, які зазвичай використовуються для дистанційного радіоуправління БПЛА.

За допомогою базових компонентів користувач може створити власну конфігурацію необхідної складності. Найпростіший варіант складається з однієї АС IsoLOG 3Dxx і мобільного або стаціонарного аналізатора спектра, чого достатньо для аналізу місцевості діаметром 8 - 10 км. Якщо потрібно мобільне рішення, система може встановлюватися на транспортному засобі, включаючи водне базування.

Точність пеленга залежить від типу антени. Стандартна антена IsoLOG3D80 забезпечує точність пеленга 4-6 градусів на сектор [6]. При виявленні сигналу антеною IsoLOG 3D160 його пеленг визначається з точністю 2-3 градуса на сектор. У разі необхідності покриття більшої площі до центрального ПК підключається декілька антен з аналізаторами спектра, якими ПК управляє одночасно. Чим ширше зона покриття, тим більше антен і аналізаторів необхідно використовувати. Сигнал від БПЛА буде прийнятий декількома антенами, завдяки чому можна отримати достовірну інформацію про місцезнаходження БПЛА і / або його оператора.

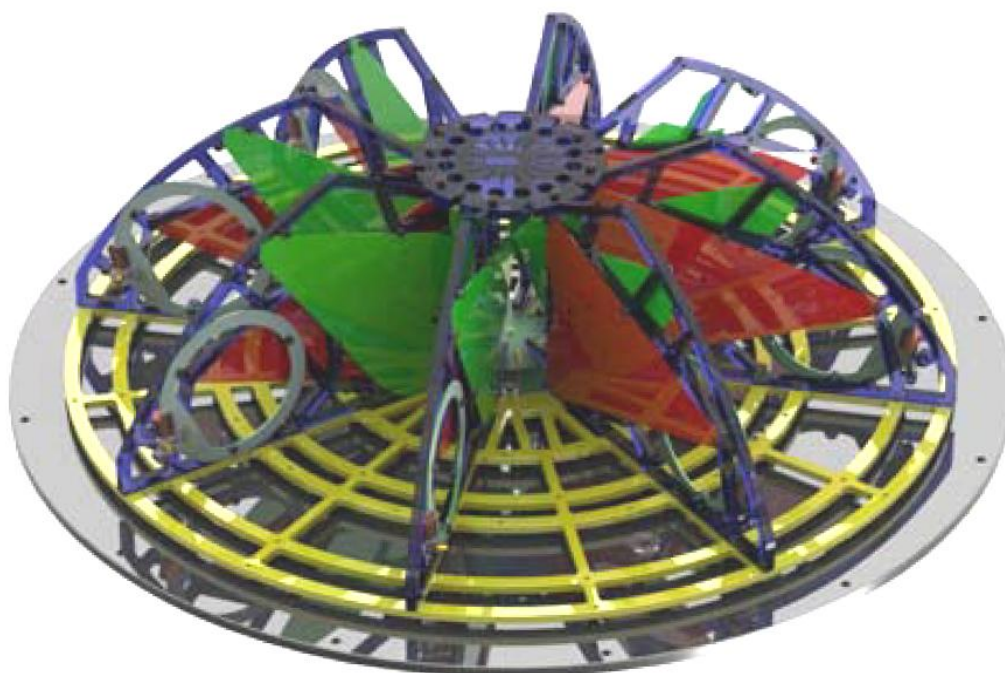


Рисунок 1.17 – 16-елементна 8-секторна антенна система IsoLOG 3D80 від компанії "Aaronia"

Оскільки система Drone Detector створена для розпізнавання радіосигналів, пов'язаних з БПЛА, вона не буде подавати тривожних сигналів в разі виявлення радіосигналів інших типів. При появі декількох БПЛА система зможе виявити всі незалежно від того, одного вони типу або різні.

Середній час, необхідне для виявлення БПЛА, становить 10 - 500 мс і залежить від числа використовуваних антен. В умовах прямої видимості

між антенами Drone Detector і БПЛА або його оператором досягаються кращі результати пеленгування (з урахуванням затінення джерела радіочастотних сигналів деревами, кущами, людьми і т. д.) [6].

Висновки до розділу 1

1. Для виявлення малорозмірних і мало швидкісних БПЛА (мікро-БПЛА), широкого застосування, що є найбільш затребуваними в рішенні цивільних і військових завдань, оптимальним є поєднання методів пасивної локації та радіорозвідки. БПЛА можуть бути виявленими засобами радіотехнічної розвідки шляхом прийому і аналізу радіосигналів ліній зв'язку та управління, радіолокаційних висотомірів, постановників активних перешкод і радіолокаційних станцій.

2. Слабким місцем БПЛА є вразливість його каналів зв'язку: сигнали GPS навігаторів, а також сигнали, що приймаються або передаються БПЛА, можна придушувати, перехоплювати і підміняти шляхом перехоплення управління.

3. Прикладами засобів радіоелектронного придушення БПЛА є станції радіорозвідки і постановки завад ARDRONIS фірми «Rohde & Schwarz», (Німеччина) та система пасивної локації радіочастотного випромінювання від бортових систем БПЛА "Drone Detector" від компанії «Aaronia».

4. Точність пеленга залежить від типу антени. Наприклад, стандартна антена IsoLOG3D80 "Drone Detector" від компанії «Aaronia» забезпечує точність пеленга 4-6 градусів на сектор.

2 ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ПЕЛЕНГАЦІЇ БПЛА КОРЕЛЯЦІЙНИМ МЕТОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ КІЛЬЦЕВОЇ АНТЕНИ

Одна з найбільш важливих проблем при організації протидії застосуванню міні- і мікро-БПЛА полягає в забезпеченні їх своєчасного виявлення і контролю за їх переміщенням і діями. Міні- і мікро-БПЛА як об'єкти розвідки характеризуються дуже низькими показниками помітності для різних видів розвідки.

Радіолокаційна помітність - не єдина демаскуюча ознака міні-БПЛА. Іншим найбільш значущою ознакою є наявність власного електромагнітного випромінювання апаратури зв'язку БПЛА, за допомогою якої організуються канали передачі даних, управління та відео спостереження на пункт управління польотом БПЛА або іншим споживачам. Так як передача даних до споживачів відбувається в реальному масштабі часу, це дає можливість здійснювати розвідку міні- і мікро-БПЛА пасивними засобами радіорозвідки.

Для систем радіолокаційної розвідки міні БПЛА і особливо мікро-БПЛА є малопомітними цілями з малою ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР) 0,01-0,1 м², своєчасне виявлення яких забезпечується при малих дальностях або взагалі не забезпечується [4].

2.1 Кореляційна обробка компонент поля з ФАР

Однак останнім часом для передачі даних апаратури БПЛА використовується скритна передача на основі технології псевдовипадкової перебудови робочих частот (ППРЧ) в широкій смузі частот близько 1 ГГц, при цьому досить, щоб на приймальній стороні лінії зв'язку забезпечувалося відношення сигнал-шум -25 дБ. Сигнали з такою низькою спектральною щільністю потужності не реєструються існуючими засобами радіотехнічної розвідки і сприймають їх як незначний фоновий шум.

Однак такі сигнали можна реєструвати, ґрунтуючись на властивостях осьової симетрії кільцевих антенних решіток, коли розподіл поля падаючої електромагнітної хвилі на антенні елементи АР з обох сторін від осі симетрії, що збігається з напрямком поширення ЕМВ, з точністю до шуму збігається. Кореляційна обробка осесиметричних розподілів поля з використанням кільцевої АР дозволяє оцінити пеленг на джерела ППРЧ сигналів, в тому числі на борту БПЛА [4].

Залишається неясним питання про можливість застосування цього підходу для визначення факту ведення радіообміну по ШС лінії зв'язку.

Рішення завдання розвідки і пеленгації міні- і мікро-БПЛА основана на можливості накопичення сигналу в процесі обробки, що підвищує тим самим відношення сигнал-шум на виході радіопеленгатора до рівня, достатнього для прийняття рішення про наявність сигналу з заданою якістю.

При кореляційній обробці широкосмугового шумоподібного сигналу на виході радіопеленгатора такий сигнал є нормально розподілена випадкова величина з математичним очікуванням типу незміщеної оцінки кореляційного моменту вхідних величин, і дисперсією, яка зменшується пропорційно кількості накопичуваних незалежних відліків сигналу. На цій властивості можна отримати оцінку необхідного часу накопичення сигналу для його виявлення з заданою якістю.

Необхідна кількість накопичуваних відліків сигналу, яке забезпечує виявлення ШС сигналу з заданою якістю, залежить від відношення сигнал-шум $q_{вх}^2$ на вході приймачів пеленгатора і оцінюється як [4]:

$$T = \frac{4}{N} \left(\frac{\Phi^{-1}(P_D) + \Phi^{-1}(P_F)}{q_{вх}^2} \right)^2 = \frac{4}{N} \left(\frac{q_{мп}^2}{q_{вх}^2} \right)^2, \quad (2.1)$$

де $\Phi(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$ – інтеграл імовірності, P_F – імовірність помилкової тривоги, P_D – ймовірність правильного виявлення, N –

кількість антенних прийомних каналів в кільцевій антенною решітці, T – кількість незалежних відліків прийнятого сигналу, q_{mp}^2 – задане відношення сигнал шум, яке забезпечує виявлення ШС сигналу з заданими показниками якості.

З співвідношення (2.1) виходить, що яке б низьке не було співвідношення сигнал-шум на вході приймачів радіопеленгатора на базі кільцевої АР, при достатньому часі накопичення можна забезпечити виявлення будь-якого ШС сигналу з заданою якістю.

Питання про достатність часу для накопичення сигналу залежить від необхідної швидкості оновлення даних, режиму роботи лінії зв'язку, стабільності роботи радіопеленгатора і ряду інших технічних і тактичних чинників. При деякому фіксованому інтервалі часу накопичення t_n можливості по пеленгації міні- і мікро-БПЛА, що використовують для передачі даних приховану ШС лінію зв'язку, обмежуються співвідношенням відстаней від БПЛА до свого пункту управління і до точки розміщення радіопеленгатора. Це співвідношення визначається як [4]:

$$\frac{R_{\text{БПЛА-ПУ}}}{R_{\text{БПЛА-КАР}}} = \sqrt{2 \frac{q_{mp}^2}{q_{cv}^2} \frac{G_{ПУ}}{G_{АЭ}} \sqrt{\frac{\Delta t}{t_n N}} f^2(\alpha)} \quad (2.2)$$

де $R_{\text{БПЛА-ПУ}}$, $R_{\text{БПЛА-КАР}}$ – дальності від БПЛА до пункту управління і до точки розміщення пеленгатора, q_{mp}^2 – необхідний для виявлення мети відношення сигнал-шум на виході каналу пеленгатора, q_{cv}^2 – відношення сигнал-шум на прийомній стороні каналу зв'язку, $G_{АЭ}$, $G_{ПУ}$ – коефіцієнти направленої дії антенних елементів кільцевої антенною решітки і антенною системи на приймальній стороні Сніп лінії зв'язку БПЛА-ПУ, $f_2(\alpha)$ – ДН антени лінії зв'язку на борту БПЛА, Δt – інтервал зняття відліків в приймачі пеленгатора.

2.2 Приклади побудови зони контролю пеленгатора ППРЧ сигналів

Використовуючи співвідношення (2.1) побудовано зони контролю пеленгатора ППРЧ сигналів. Були оцінені можливості виявлення пеленгатором з кільцевою АР ППРЧ сигналу міні- і мікро-БПЛА типу RQ- 11 і RQ-7, що використовують для передачі даних приховану ППРЧ лінію зв'язку [4].

Сценарій №1. Мікро-БПЛА типу RQ-11 здійснює політ в зоні пошуку. Розміри зони становлять 8×8 км по фронту і в глибину. Політ відбувається на висоті 300 м. Максимальне видалення від пункту управління польотом становить 10 км. Пункт управління БПЛА знаходиться за межами зони пошуку на видаленні до 2 км. Апаратура передачі даних на борту БПЛА використовує ненаправлену в азимутальній площині антену, що забезпечує однакові умови прийому та передачі незалежно від орієнтації БПЛА. Потужність передавача адаптується до дальності зв'язку, забезпечуючи в точці прийому постійне відношення сигнал-шум -25 дБ. Ширина спектра сигналу апаратури БПЛА- 1 ГГц. У пункті управління БПЛА є ППРЧ спрямована антена з шириною ДН по азимуту і куту місця 60° (КНД 10 дБ), що забезпечує зв'язок з БПЛА в межах зони пошуку. Пеленгатор Сніп сигналу на базі 60-ти каналної кільцевої антеною решітки розміщений на відстані 2 км від тилової межі зони пошуку БПЛА. Результати оцінки зони виявлення мікро-БПЛА по власному випромінюванню ППРЧ апаратури представлена на рис. 2.1, де точковими лініями позначені межі контрольованої зони пеленгатором Сніп сигналу при різних значеннях часу накопичення сигналу [4].

Зона контролю розташовується праворуч від граничної лінії, в центрі якої знаходиться пеленгатор. З рис. 2.1 видно, що при збільшенні часу накопичення сигналу межа зони наближається до пункту управління БПЛА, охоплюючи його з двох сторін. При недостатньому часу накопичення контрольована зона зменшується, в межі скорочуючись до невеликої

півсфері навколо пеленгатора. Для сценарію №1 найбільш раціональним варіантом є час накопичення рівне або більше 1 мс, яке позначено лінією з великими точками. Межі контрольованих зон були отримані для ймовірності правильного виявлення 0,5 при ймовірності помилкової тривоги 10-6. Для забезпечення більшої ймовірності виявлення цілей при тих же межах потрібно збільшувати час накопичення сигналу. Так, для збільшення ймовірності виявлення до 0,9 час накопичення потрібно збільшити на 60%.

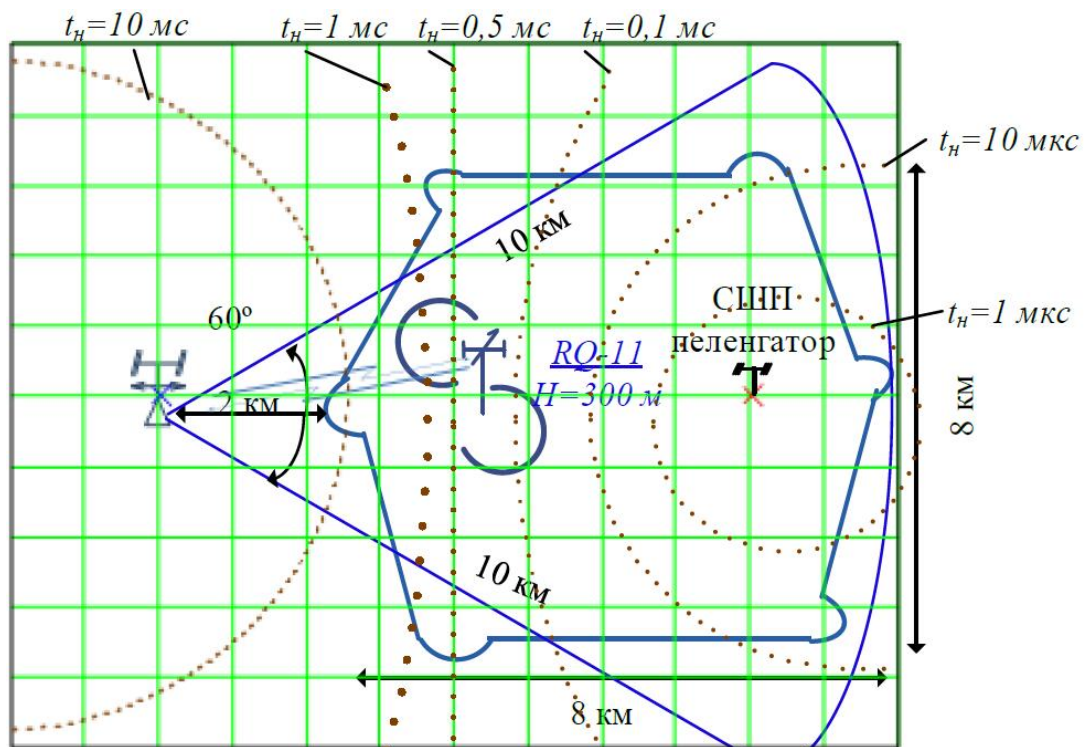


Рисунок 2.1 — Зони контролю пеленгатора ППРЧ сигналів для ситуації №1

Сценарій №2. Міні-БПЛА типу RQ-7 здійснює політ в зоні пошуку розмірами 15×25 км по фронті і в глибину. Політ відбувається на висоті 500 м. Максимальне видалення від пункту управління польотом становить 70 км. Пункт управління БПЛА знаходиться за межами зони пошуку на видаленні до 40 км. Апаратура передачі даних ПУ міні-БПЛА використовує керовану антену, головний пелюстка якої має ширину до 40° (коефіцієнт спрямованої дії 13 дБ) і рівнем бічних пелюсток -15 дБ. Сніп

лінія зв'язку з БПЛА формується спрямованою антеною, яка орієнтована на пункт управління і забезпечує задані умови прийому та передачі в межах зони пошуку. Пеленгатор Сніп сигналу на базі 60-ти каналної кільцевої АР розміщений на відстані 30 км від пункту управління польотом БПЛА. Результати оцінки зони виявлення БПЛА по власному випромінюванню ППРЧ апаратури БПЛА представлені на рис. 2.2 [4]. Так само, як і в сценарії №1, точковими лініями позначені межі контрольованої зони пеленгатора ППРЧ сигналу при різних значеннях часу накопичення сигналу.

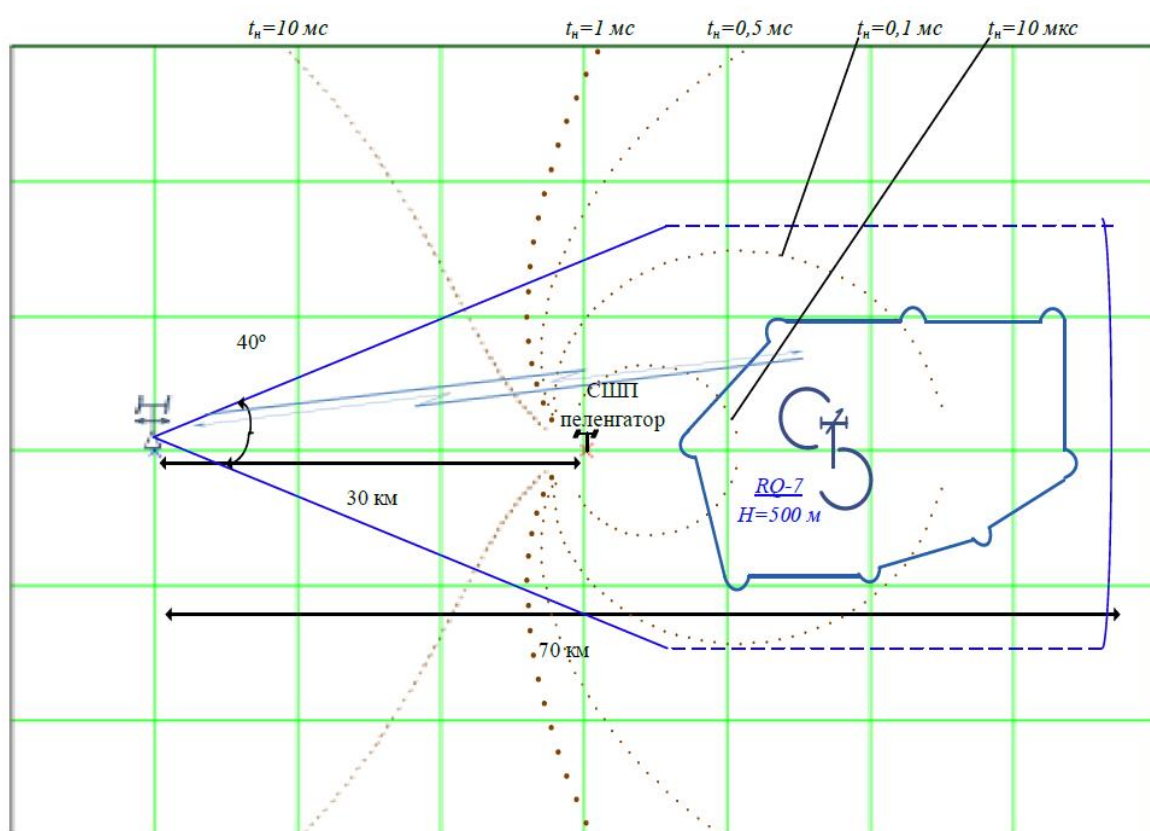


Рисунок 2.2 — Зони контролю пеленгатора ППРЧ сигналів для ситуації №2

Можна відзначити, що конфігурація зони контролю пеленгатора сценарію №2 істотно відрізняється від сценарію №1. Близня межа зони розташовується поблизу позиції пеленгатора, а сам кордон має глибокий провал по лінії, що з'єднує пункт управління БПЛА і пеленгатор. Ця особливість пояснюється наявністю на борту БПЛА антени, спрямовані

характеристики якої мають мінімальні значення в напрямку, протилежному напрямку радіообміну. Тому при прольоті БПЛА між своїм пунктом управління і пеленгатором, антена лінії зв'язку БПЛА буде повернута в бік пункту управління, а в напрямку пеленгатора значення характеристики спрямованості буде мінімальним. Проте, передбачувана зона патрулювання БПЛА буде знаходитися всередині контрольованої зони пеленгатора.

Як видно з рис. 2.2, при часі накопичення сигналу більше 1 мс, до контрольованої зони можна віднести всю частину повітряного простору, яка знаходиться за точкою розташування пеленгатора, з границею, перпендикулярною лінії, що з'єднує його з пунктом управління БПЛА.

Таким чином, радіопеленгатори ППРЧ сигналів на базі кільцевої антеною решітки можуть виявляти міні- і мікро-БПЛА, що використовують для передачі даних псевдовипадкові ШС сигнали при виконанні ними розвідувальних завдань в реальному часі. Розміри контрольованої зони при розвідці мікро-БПЛА перекривають значну частину зони баражування БПЛА, якщо пеленгатор розміщувати в межах зони баражування. При розвідці міні-БПЛА, в яких для зв'язку з наземним пунктом управління застосовуються адаптивні антени, контрольована зона розташовується за позицією розміщення пеленгатора. Розвідка міні-БПЛА в передній півсфері пеленгатора при цьому не забезпечується. Розміри і конфігурація контрольованої зони, в межах якої забезпечуються задані показники якості виявлення джерела Сніп сигналу, істотно залежить від часу накопичення сигналу. Найбільший ефект при виявленні міні- і мікро-БПЛА досягається при часі накопичення сигналу більше 1 мс.

Таким чином, радіопеленгація на базі кільцевої антеною решітки міні- і мікро-БПЛА, які для передачі даних використовують псевдовипадкові ШП сигнали, дозволяє забезпечувати їх виявлення і контроль за їх діями.

Висновки до розділу 2

1. При достатньому часі накопичення можна забезпечити виявлення будь-якого ШС сигналу з заданою якістю яке б низьке ВСШ не було на вході приймачів радіопеленгатора з кільцевою АР.

2. Радіопеленгація на базі кільцевої антеної решітки міні- і мікро-БПЛА, які для передачі даних використовують ППРЧ сигнали, дозволяє забезпечувати їх виявлення і контроль за їх діями.

3 ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОЕЛЕМЕНТНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ РАДІОПЕЛЕНГАТОРА

Різні вимоги до цифрових систем радіопеленгації, потребують розробки антен, що відрізняються типом, частотним діапазоном, широкосмуговістю, габаритами і т.д. [7].

Нижче розглянуті антени, які можна використовувати при побудові малогабаритних антен для радіопеленгаторів у складі переносних систем виявлення та пеленгації мікро- і міні- БПЛА, які працюють в діапазоні частот 2400-2483.5 МГц.

3.1 Антена перевернутого типу ІЛА

Першим зразком таких антен для радіопеленгації у складі переносних систем виявлення та пеленгації мікро і міні БПЛА можна запропонувати найпростіший L -подібний диполь (Inverted L Antenna - ІЛА), який розташований в перевернутому вигляді над плоским екраном (рис. 3.1), звідси й термін "інверсний" [8-9]. Його сучасне застосування - наслідок природного прагнення сховати антенний випромінювач всередину радіопрозорі оболонки антенної системи пеленгатора. У вітчизняній літературі диполь цього типу відомий як Γ -подібний *вібратор*.

На вертикальній сегмент перевернутого L диполя подає живлення. Його вільний кінець через повітря або діелектрик навантажений на еквівалентну ємність, утворену повітряним проміжком або діелектриком, розташованим між горизонтальним сегментом і екраном. Перевернута L антена досить проста у виготовленні. За багатьма електричними характеристиками вона подібна до короткої монопольної антени. Її діаграма спрямованості майже ідентична ДН короткого монополя, який є всеспрямованим в площині, перпендикулярній його осі, і не випромінює в співвісний напрямку. Однак внаслідок додаткового випромінювання,

обумовленого геометрією перевернутого L -диполя, його ДН несиметрично деформована в площині, де у звичайного диполя ДН кругова.

Резонансна довжина хвилі диполя ПЛА визначається його геометричними розмірами відповідно до виразу [8]:

$$\lambda = 4(h+L) \quad (3.1)$$

де h - висота диполя над екраном, L - довжина його горизонтального сегмента.

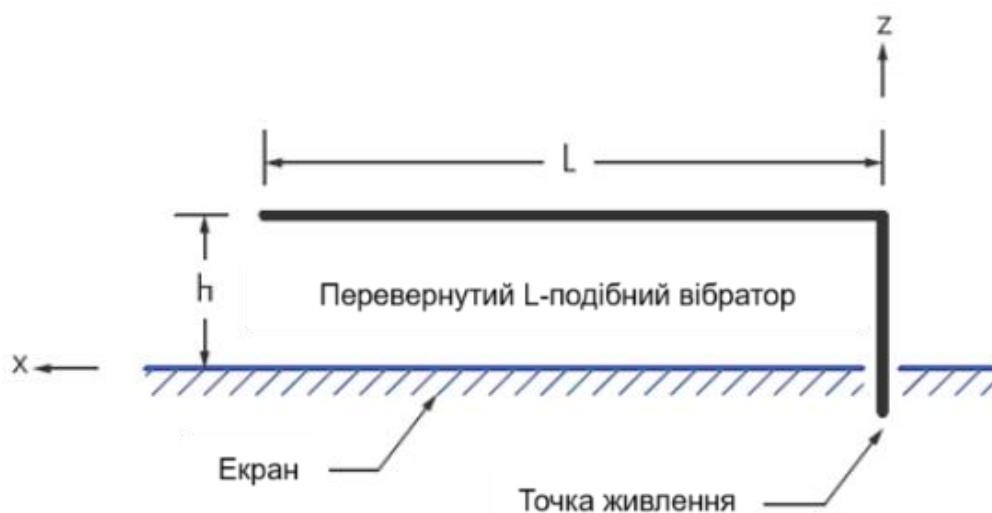


Рисунок 3.1 — Перевернутий L -подібний диполь

Як і у звичайного монополя, активний опір перевернутої L -антени має невелике значення (не більше 4 Ом), а реактивність складає сотні Ом, що ускладнює узгодження з лінією живлення.

Внутрішній опір ПЛА розраховується за наближеною формулою:

$$R_{\text{ПЛА}} = 40 (kh)^2 \left(1 - \frac{h}{2(h+L)} \right)^2, \quad (3.2)$$

яка отримана на підставі комплексної теореми Пойтинга в припущенні лінійного зміни струму в антені [8].

Реактивна складова внутрішнього опору ПЛА в режимі прийому визначається як [8]:

$$\begin{aligned}
X_{ILA} = & \frac{-60h \left(2 - \frac{h}{h+L} \right)}{k(h+L)^2} \left[\ln \left(\frac{2h}{a_0} \right) - \frac{a_0}{h} + \frac{L_a T - h}{\sqrt{L_a^2 + h^2}} - \right. \\
& - \frac{5(kh)^2}{8} + \left. \left(\frac{(kh)^2}{2} \left(1 + \frac{L}{h} \right)^2 \right) \ln \left(\frac{2h}{a_0} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{(kh)^2}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{L_a}{h} \right)^2} + \frac{(kh)^2}{2} T \cdot \ln \left(\frac{L_a + \sqrt{L_a^2 + h^2}}{h + a_0} \right) \right],
\end{aligned} \tag{3.3}$$

де a_0 – діаметр провода, $L = L_a + a_0$, $T = 1 - a_0 / h$.

Крім ІЛА, виготовлених з дроту, можливий варіант їх виконання на основі мікросмужкових ліній (МСЛ). Так, відома конструкція двохдіапазонної антени ІЛА в друкованому виконанні у вигляді щілини (рис. 3.2) [8].

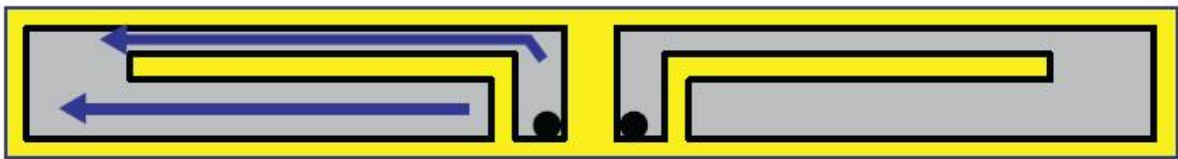


Рисунок 3.2 — Антена ІЛА з плечами в друкованому виконанні

Габарити ІЛА антени - 5 x 34 мм. ІЛА антени розрахована на роботу в діапазонах частот ISM 2,4 ГГц / UNII 5,2 ГГц. Ширина смуги пропускання в першому діапазоні згідно з результатами експериментальних вимірювань становить 7%, а в другому - 10% (рис. 3.3) [8].

Як і будь-яка багато діапазонна антена, така антена програє в направлених властивостях по відношенню до півхвильового диполя, розрахованого на конкретний діапазон.

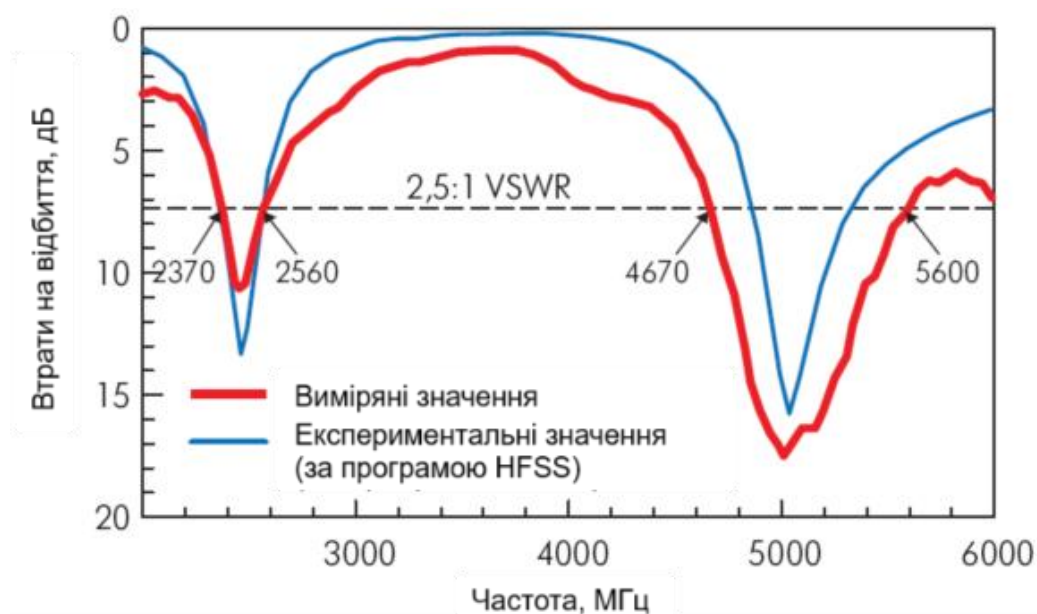


Рисунок 3.3 — Частотна характеристика диполя з плечами типу ІЛА

Коефіцієнти підсилення різних варіантів друкованих диполів наведені на рис. 3.4 [8].

№	Зовнішній вид антени	Коефіцієнт підсилення, дБі	
		2,4 ГГц	5,2 ГГц
1		4,3	3,9
2		4,7	3,8
3		4,2	2,4
4		4,2	3,6
5		2,7	4,9
6		5,8	—
7		—	5,1

Рисунок 3.4 — Коефіцієнти підсилення різних типів друкованих диполів

Місце антени (рис. 3.2) серед інших альтернативних варіантів показано на рис.3.4 (варіант 5). Як видно, плата за компактність в даному випадку незначна і не перевищує 3,1 дБі в порівнянні з диполем рис. 3.4 у друкованому виконанні (варіант 6), де коефіцієнт підсилення становить

5,8 дБі в діапазоні 2,4 ГГц. Для роботи в діапазоні частот 5,2 ГГц ця різниця становить всього 0,2 дБі. Слід мати на увазі, що для багатьох додатків краще використовувати антени з мінімальною спрямованістю.

3.2 Антени перевернутого типу IFA

Наступним типом низькопрофільних антен є друкована перевернута F-подібна антена (Inverted F Antenna, IFA) (рис. 3.9) [9].

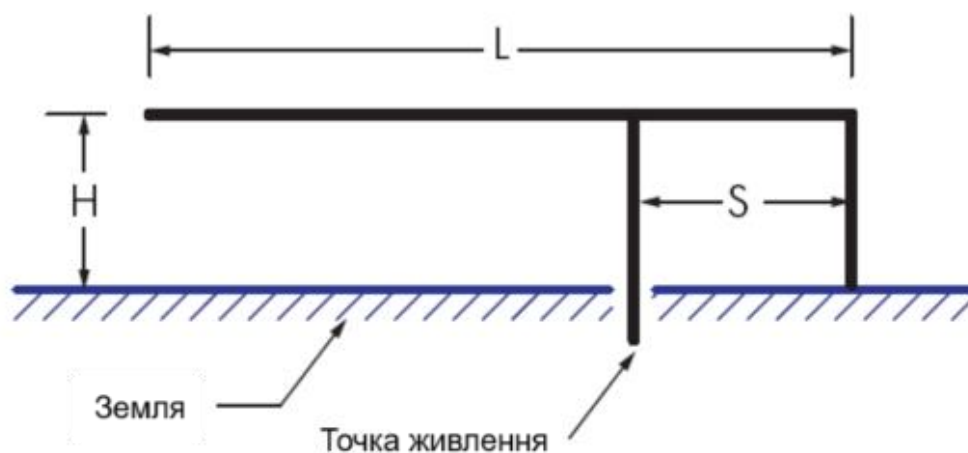


Рисунок 3.5 — Перевернута F-подібна антена

Антена цього типу є два співвісних L-диполя різної довжини (рис. 3.5), при цьому зовнішній L-диполь навантажений на корпус, а живлення подається через «внутрішній» L-диполь.

Фізичні розміри IFA визначаються трьома факторами: частотою резонансу МСЛ, відносною діелектричної проникності підкладки на якій розташована антена і власне її товщиною. Великі значення відносною діелектричної проникності підкладки та її товщини призводять до того, що ЕМП більш щільно зосереджене в підкладці.

Головний випромінюючий елемент IFA має зазвичай розмір $\lambda_g / 4$, (λ_g - довжина хвилі, що розповсюджується в МСЛ), хоча для кращих РЧ характеристик доцільно вибрати довжини диполя $\lambda_g / 2$ або λ_g . Один кінець антени заземлюється за допомогою міжшарових переходів, яких повинно бути більше при наближенні до точки заземлення, що зменшує

поле до нуля. На протилежному кінці $\lambda_g/4$ елемента, навпаки, поле максимальне, що і формує активну область випромінювання антени. Область противаги і область вільна від противаги визначають діапазон робочих частот антени. Положення точки живлення антени вздовж $\lambda_g/4$ елемента визначає необхідний вхідний імпеданс, що використовується при узгодженні антени з входом приймально-передавального вузла.

Введення внутрішнього L-сегмента забезпечує гнучке управління вхідним опором антени і спрощує її узгодження. Змінюючи відстані S між вертикальними секціями, можна домогтися прийняттого значення реактивного опору антени, причому зміна S не впливає на резонансну частоту ІФА.

Для розширення робочого діапазону частот використовується гібридна конструкція, що складається з двох паралельно розташованих над металевим екраном L- і F- подібних дипольних антен. Цей тип антен називається подвійна перевернута F-антена [8-9]. У такому варіанті конструкції L-антена є пасивним елементом. Її довжина дорівнює довжині перевернутої F-антени (рис.3.6).

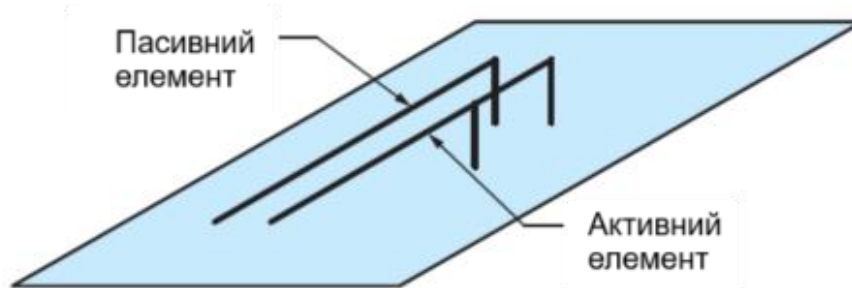


Рисунок 3.6 — Подвійна перевернута F-антена

Подібне рішення дозволило вдвічі розширити граничну смугу пропускання, довівши її до 4% від номінального значення резонансної частоти. Габарити такої DIFA - 0,6x8,6 см.

При уважному розгляді структури подвійної перевернутої F-антени виникає питання про ефективність використання декількох L-антен

спільно з F-диполем, що стимулює перехід до якісно нової конструкції планарної F-подібної антени (Planar Inverted-F Antenna, PIFA) [9]. Саме антену цього типу можна вважати прийнятною альтернативою спіральним антенам. Типова однодіапазонні PIFA показана на рис. 3.7.

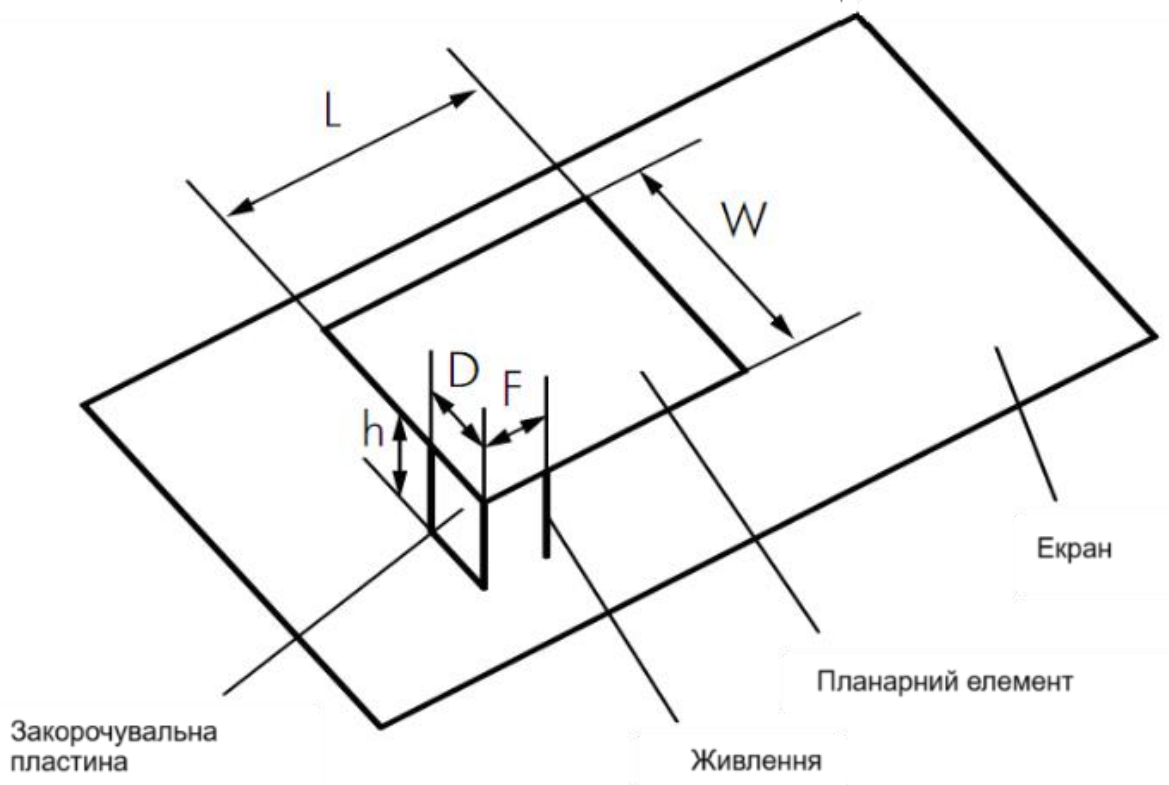


Рисунок 3.7 — Однодіапазонна планарна F- подібна антена

3.3 Моделювання багатоелементної пеленгаційної антени на основі ПЛА

Згідно завдання необхідно розробити чотирьохелементну антенну систему, яку можна використовувати при побудові малогабаритних антенних систем для радіопеленгаторів у складі переносних систем виявлення та пеленгації мікро- і міні- БПЛА, які працюють в діапазоні частот 2400–2483.5 МГц. В складі антенних елементів для чотирьохелементної пеленгаційної антенної системи обрана слабонаправлена антена ПЛА, тому що задовольняє наступним вимогам:

- має малі габарити;
- достатньо технологічна;

- має гарне узгодження в заданій смузі частот;
- має необхідні спрямовані властивості (всеспрямованість);
- вертикальну або горизонтальну поляризацію.

Для забезпечення секторного прийому з кутом в 90° в азимутальній площині антени ПЛА зміщені одна відносно одної на кути 90° .

Нижче проведено моделювання антени ПЛА в редакторі електродинамічної топології EMSight пакета Micro Wave Office [10].

3.3.1 Завдання параметрів модельованої діелектричної структури

Створення антени ПЛА починається з формування параметрів корпусу, в якому буде знаходитися антена, для чого в діалоговому вікні Substrate Information слід задати параметри модельованої діелектричної структури в трьох закладках: Enclosure, Dielectric Layers і Boundaries (рис. 3.8 - 3.10).

Розмір корпусу задається на першій сторінці діалогу Enclosure (рис. 3.8). У групі елементів Box Dimensions необхідно встановити розміри модельованої діелектричної структури (200 мм) і параметри сітки, які визначаються числом поділів (100) X-Dimension і Y-Dimension в напрямках координат X і Y. При цьому розмір сітки становитиме 2 мм.

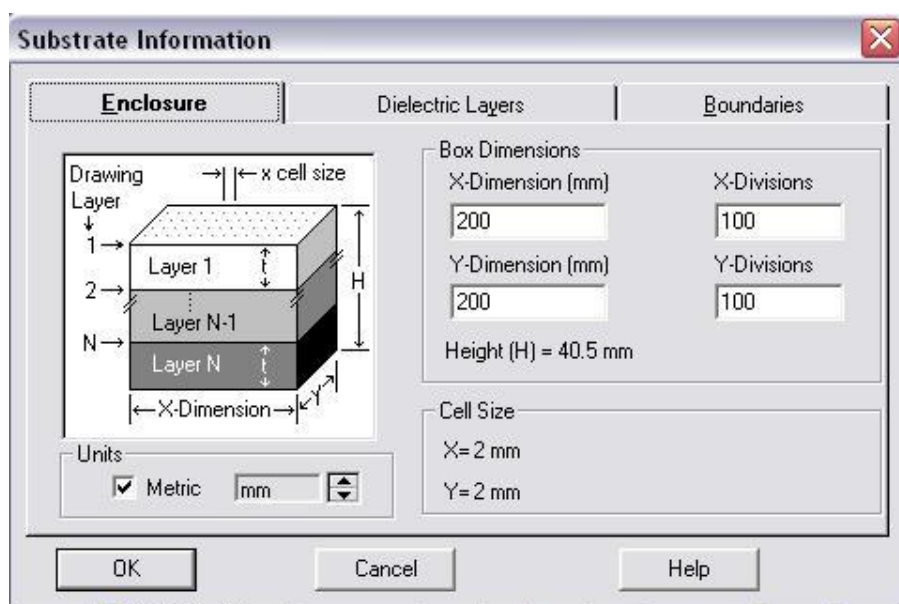


Рисунок 3.8 — Розмір корпусу антени ПЛА, що моделюється

Далі, на закладці Dielectric Layers вікна Substrate Information слід задати параметри діелектричних шарів структури, що моделюється, і задати граничні умови (рис. 3.9). Модель антени містить три шари: перший і третій - повітря, другий - діелектрична підкладка з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 2.33$. В цьому вікні слід задати параметри існуючих діелектричних шарів:

Layer – номер діелектричного шару;

Hatch та Via Hatch – вид штриховки шару;

Thickness – товщина діелектричного шару;

ϵ_r – відносна діелектрична проникність;

Loss Tangent – тангенс діелектричних втрат;

Bulk Cond (S/M) – провідність шару;

View Scale – масштаб, що дозволяє зробити перегляд дуже тонких шарів на тривимірному зображенні структури, що моделюється, більш наочним.

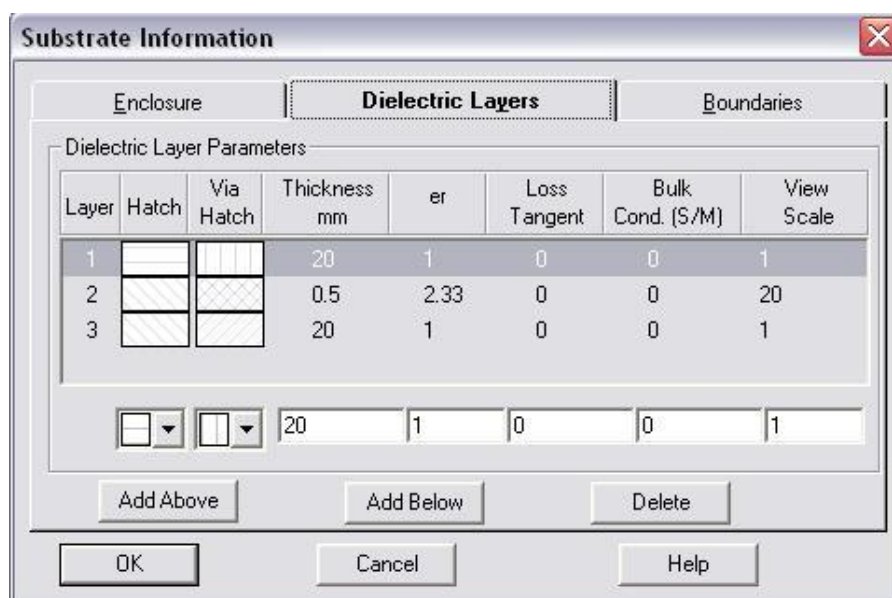


Рисунок 3.9 — Параметри діелектричних шарів ІЛА

Після введення даних загальна товщина шарів, а, отже, товщина всієї багат шарової електродинамічної структури підраховується автоматично і

відображається на закладці Enclosure в групі елементів Box Dimensions навпроти напису Height (H).

Граничні умови встановлюється в закладці Boundaries (рис. 3.10).

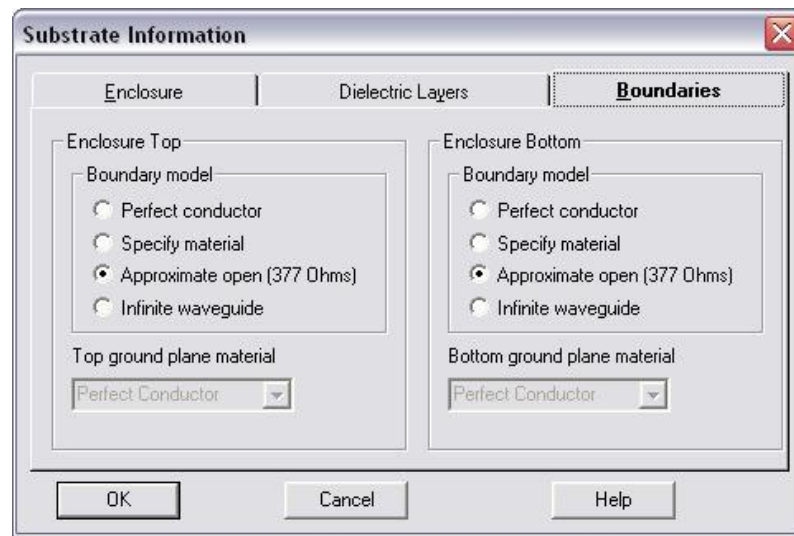


Рисунок 3.10 — Граничні умови моделі ІЛА

Для моделі антени для нижнього і верхнього шару необхідно вибрати опцію Approximate open, що еквівалентно вибору граничного матеріалу, який має опір 377 Ом, що приблизно дорівнює хвильовому опору вільного простору. Використання такого граничного опору 377 Ом - це наближення вільного простору, що забезпечує достатню точність для більшості задач.

3.3.2 Створення топології антени ІЛА

Нанесення провідників антени будемо виконувати в такому порядку: на другому шарі буде розташована топологія самих випромінюючих елементів ІФА, а на третьому шарі буде розташовуватися підкладка.

При визначенні геометричних розмірів випромінюючих елементів ІЛА скористуємось умовою (3.1) коли

$$h + L = \lambda / 4 = 31.5 \text{ мм.}$$

Для вихідних даних геометричних розмірів ІЛА виберемо наступні варіанти (див. табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Варіанти розмірів антени ПЛА

	h , мм	L , мм
1	5	26
2.	10	21
3.	15	16
4.	20	11

Ширину провідників випромінюючих елементів ПЛА виберемо рівними 2 мм. Загальний 3D вигляд антени з пошаровим виділенням показаний на рис. 3.11.

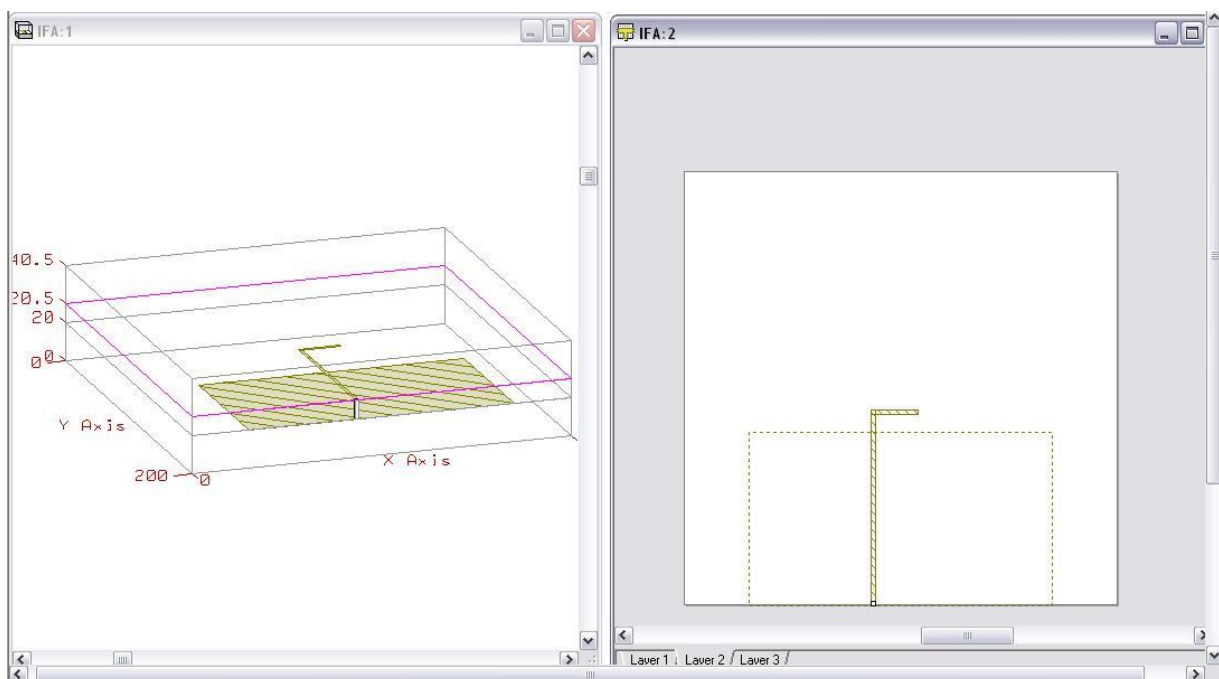


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд ПЛА антени

Розглянемо 4 варіанти геометричних розмірів випромінюючих елементів ПЛА згідно табл. 3.1 з точки зору основних електричних характеристик: коефіцієнта відбиття (параметр S_{11}) на вході антени (модуль, дійсна і уявна частини), вхідного опору антени (модуль, дійсна і уявна частини) і коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі (КСХН).

Для цього по команді Options\Project Options... потрібно встановити частоту моделювання, для чого у вікні Project Options і на закладці

Frequency Values встановити частоту розрахунку в діапазоні частот 2.2-2.6 ГГц з кроком 0.1 ГГц.

Частотна залежність коефіцієнта відбиття (модуль, дійсна і уявна частини) на вході антени (параметр S_{11}) наведена на рис. 3.12.

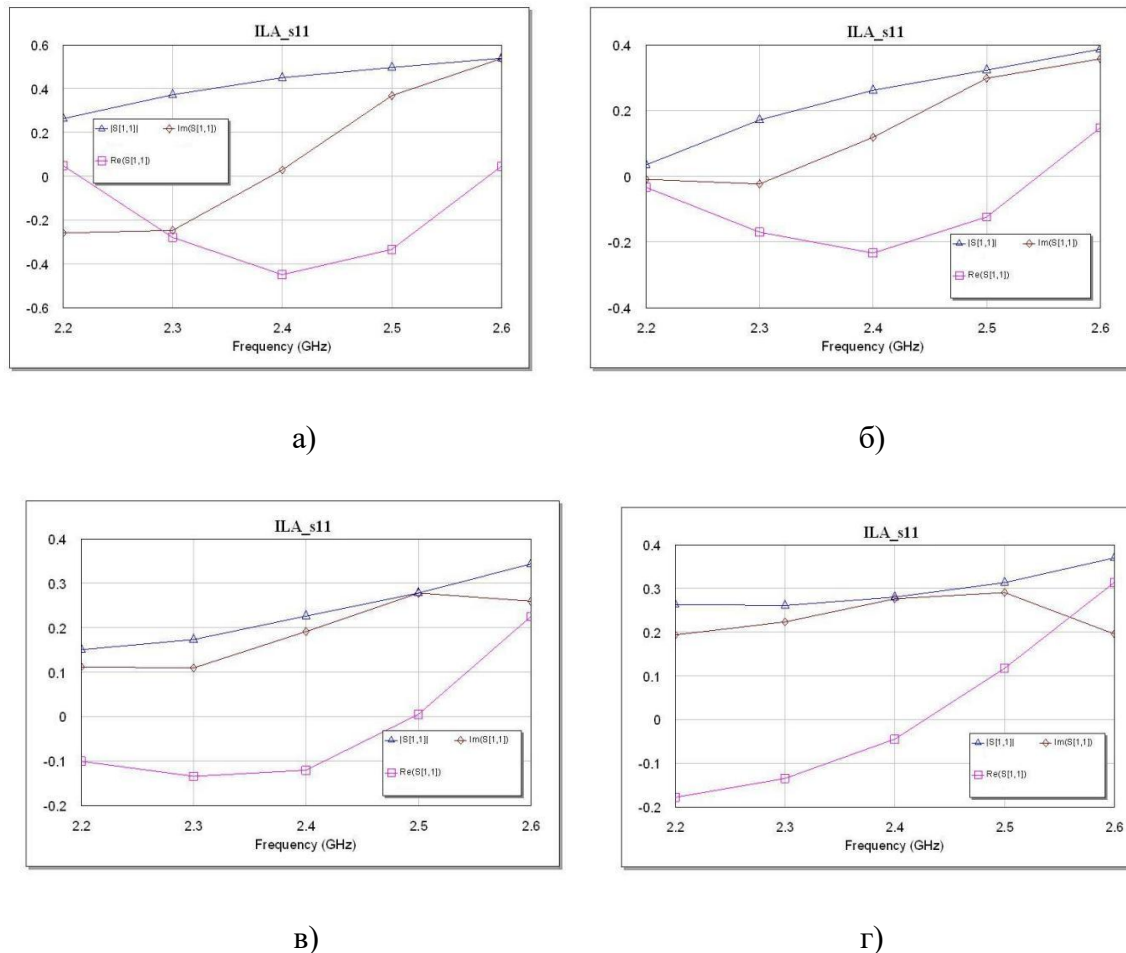


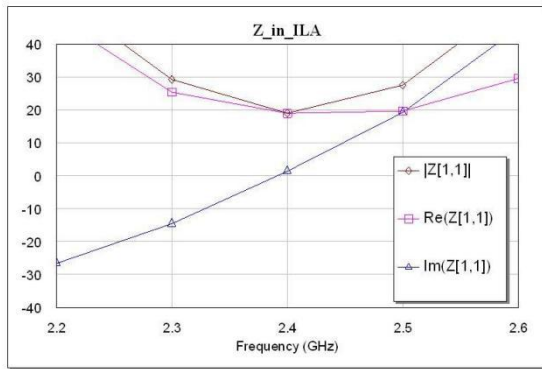
Рисунок 3.12 – Частотна залежність коефіцієнта відбиття S_{11}

антени ІЛА при $h+L=5+26$ мм (а), $h+L=10+21$ мм;

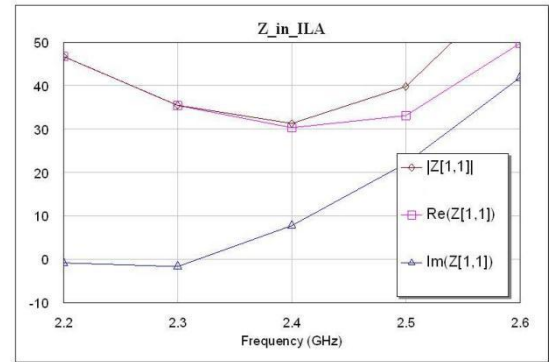
(б), $h+L=15+16$ мм (в) та $h+L=20+11$ мм (г)

Як видно з рис. 3.12 модуль коефіцієнта відбиття на центральній частоті становить $|S_{11}| = 0.28$ при $h + L = 10 + 21$ мм і $|S_{11}| = 0.23$ при $h + L = 15 + 16$ мм, що відповідає умовам забезпечення узгодження антени з зовнішніми колами.

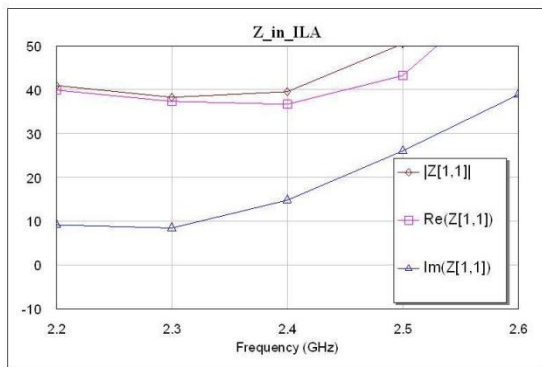
Далі побудована частотна залежність вхідного опору антени (модуля, дійсної і уявної частин), яка наведена на рис. 3.13.



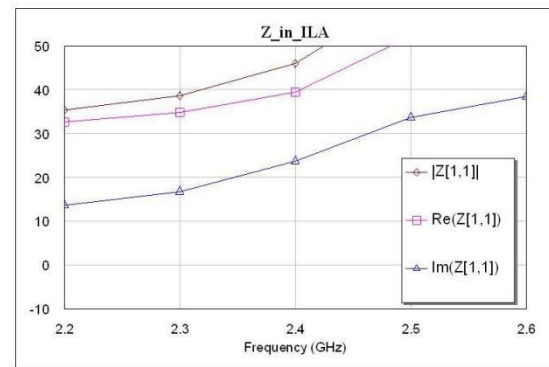
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.13 – Частотна залежність вхідного опору моделі антени ІЛА при $h+L=5+26$ мм (а); $h+L=10+21$ мм (б); $h+L=15+16$ мм (в) та $h+L=20+11$ мм (г)

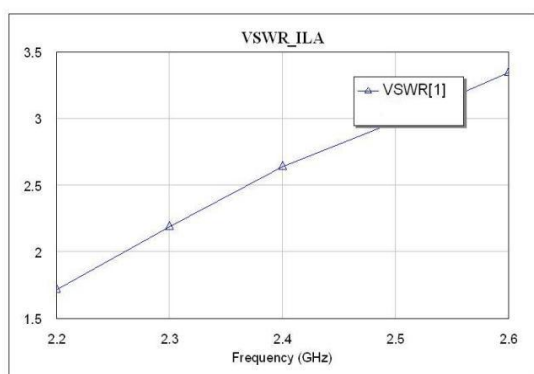
Як видно з наведених залежностей моделювання, при зростанні розміру h антени ІЛА зменшується ємнісна складова реактивного опору, що пояснюється зменшенням ємнісного зв'язку елемента L з підкладкою. У табл. 3.2 наведено узагальнені результати моделювання антени ІЛА щодо її вхідного опору на центральній частоті 2.4 ГГц.

Таблиця 3.2 - Вхідний опір антени ІЛА на частоті 2.4 ГГц

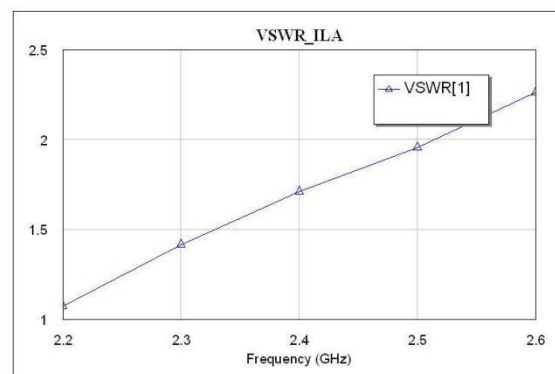
	$h+L=5+26$ мм	$h+L=10+21$ мм	$h+L=15+16$ мм	$h+L=20+11$ мм
$ Z $, Ом	20	32	40	45
$\text{Re}(Z)$, Ом	20	30	37	40
$\text{Im}(Z)$, Ом	0	8	15	24

Як видно з табл. 3.2 вхідний опір антени (модуль і дійсна частина) становить нижче 50 Ом, а уявна частина має індуктивний характер, що вимагає додаткових заходів щодо узгодження.

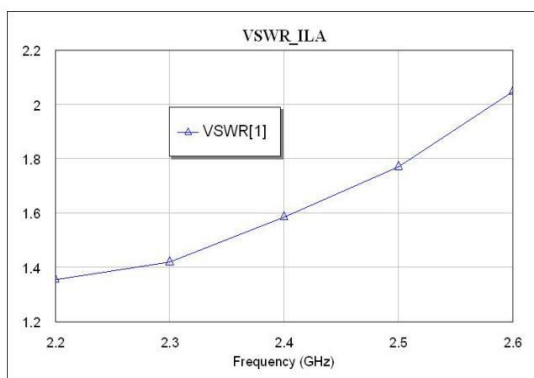
Частотна залежність коефіцієнта стоячої хвилі по напрузі (КСХН) наведена на рис. 3.14, звідки видно, що найкраще узгодження антена ІЛА має на центральній частоті 2.4 ГГц при $h + L = 10 + 21$ мм і $h + L = 15 + 16$ мм, де її КСХН ~ 1.6 .



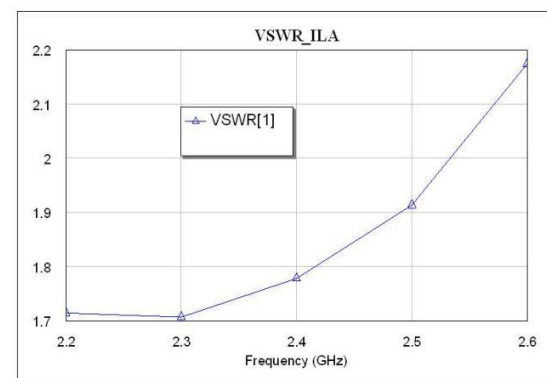
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.14 – Частотна залежність КСХН моделі ІЛА при $h+L=5+26$ мм (а); $h+L=10+21$ мм (б); $h+L=15+16$ мм (в) та $h+L=20+11$ мм (г)

Таким чином, виходячи з отриманих результатів щодо геометрії одиночної антени ПЛА $h + L = 6 + 25 = 31$ мм, на рис. 3.15 наведена модель чотирьох елементної антенної системи для використання при побудові малогабаритних антен для радіопеленгаторів у складі переносних систем виявлення та пеленгації мікро- і міні- БПЛА для діапазону частот 2400-2483.5 МГц, а на рис. 3.16 наведена її геометрія.

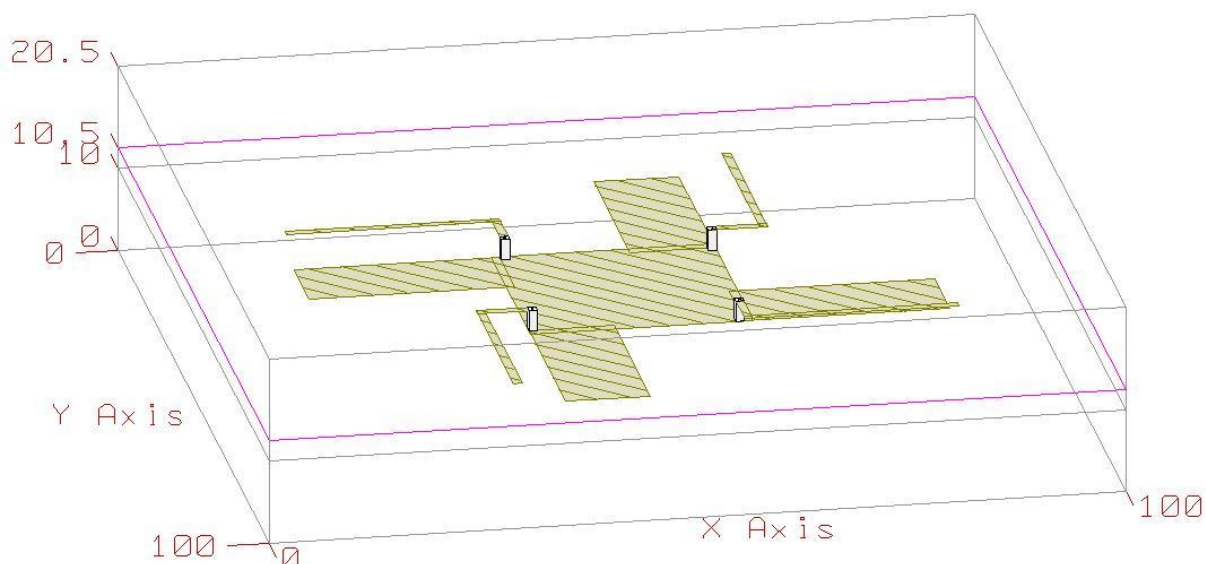


Рисунок 3.15 – Модель чотирь елементної антенної системи на основі ПЛА при побудові малогабаритної радіопеленгаторної антенної системи

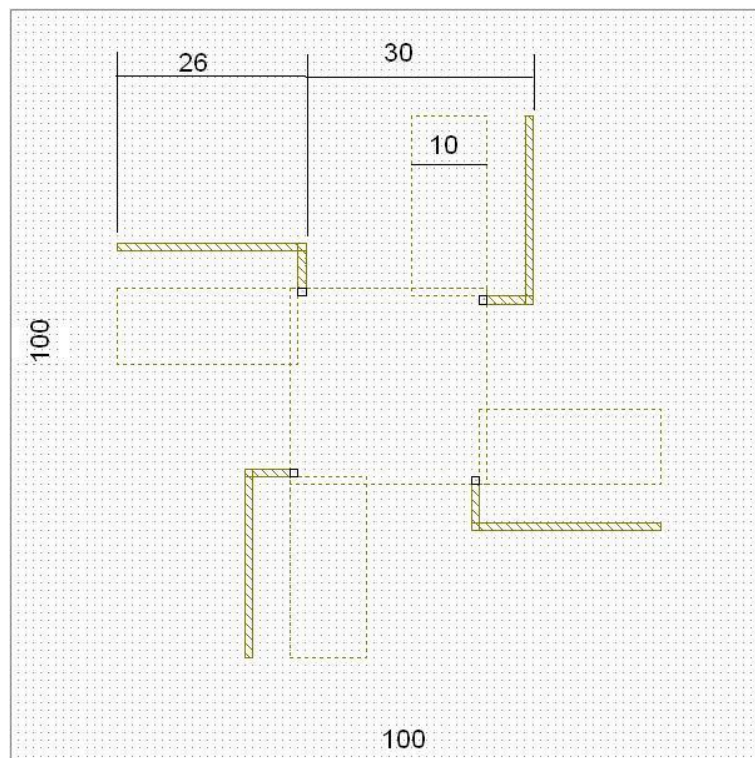


Рисунок 3.16 – Розміри антен ПЛА та підложки

3.3.3 Установка портів збудження антени ПЛА

В антені ПЛА використовується тільки порт збудження. Для створення порту збудження за допомогою команд Draw \ Add Via Port на кінці провідника живлення в другому шарі антени створити квадрат розміром 1 на 1 клітинку сітки, потім вибрати, що це порт збудження (вказати у вікні Port Attributes опцію Excitation Port і встановити значення Avail. Power і Phase рівними 0). На рис. 3.17 показаний фрагмент пеленгаційної антенної системи, де порти 1,2,3,4 – порти збудження.

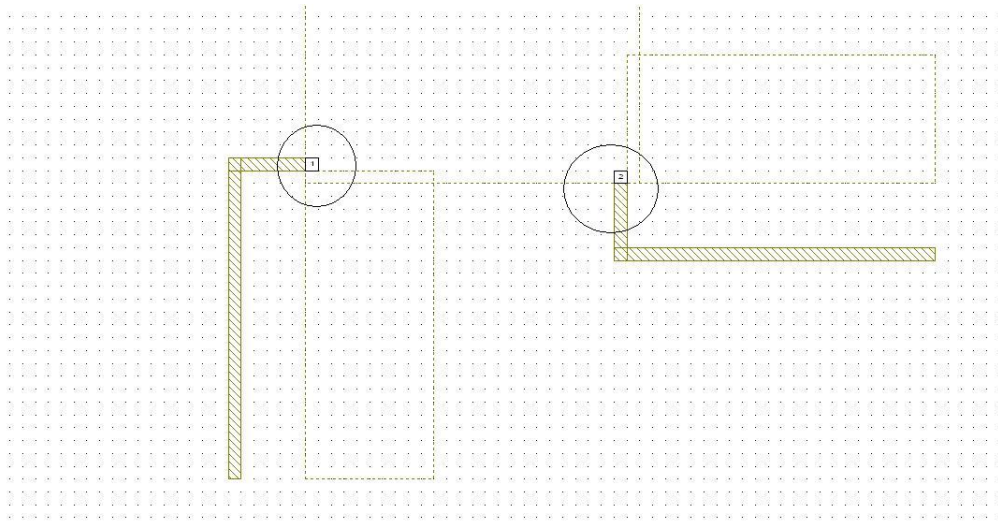


Рисунок 3.17 – Фрагмент пеленгаційної антенної системи на основі
 ПЛА з портами збудження

3.3.4 Результати моделювання пеленгаційної антенної системи на основі ПЛА

Наступним кроком є установка частоти розрахунку і побудова графіків результатів моделювання. За командою Options \ Project Options ... у вікні Project Options і на закладці Frequency Values встановити діапазон частот розрахунку 2.2 - 2.6 ГГц з кроком 0.05 ГГц.

Частотна залежність коефіцієнта відбиття S_{11} (модуль, дійсна і уявна частини) на вході пеленгаційної антени наведена на рис. 3.18. Як видно з отриманих залежностей (рис. 3.18) на центральній частоті модуль $S_{11} = 0.4$, що потребує додаткових заходів щодо узгодження із зовнішніми колами.

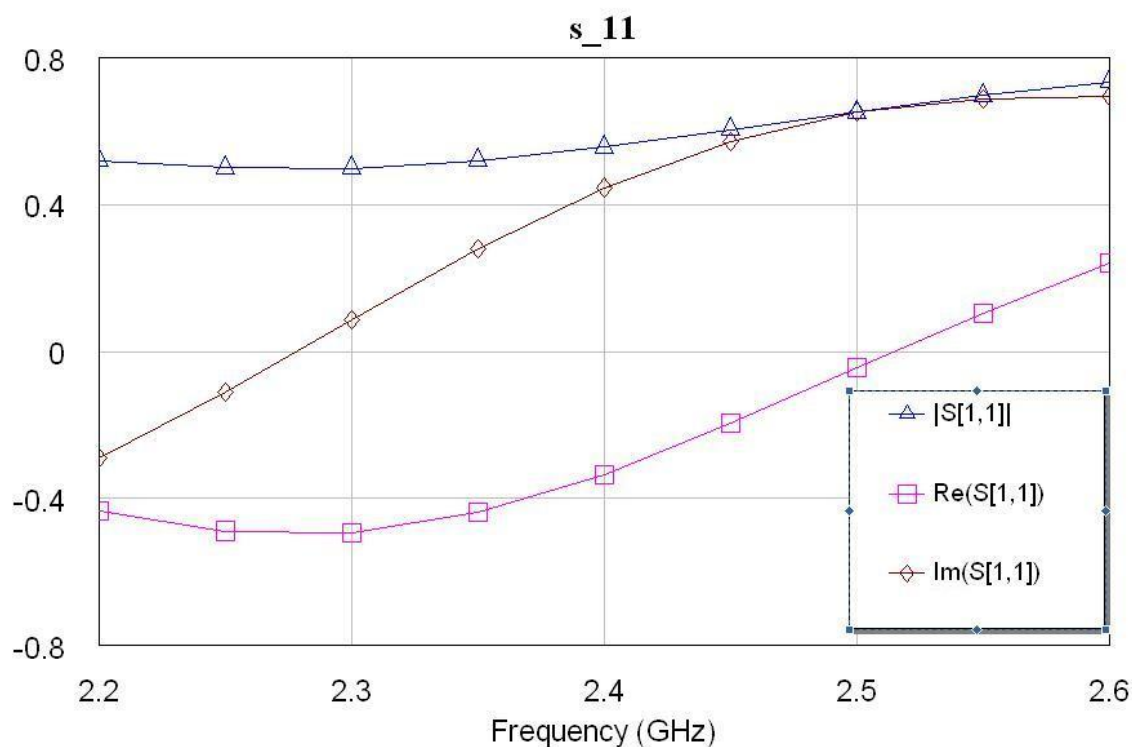


Рисунок 3.18 – Частотна залежність коефіцієнта відбиття пеленгаційної антени

На рис. 3.19 наведена частотна залежність вхідного опору пеленгаційної антени з ІЛА (модуль, дійсна і уявна частини). Як видно з рис. 3.19 вхідний опір антени (модуль і дійсна частина) приблизно дорівнюють 20 Ом, а уявна частина дорівнює близько 0.

На рис. 3.20 наведена частотна залежність коефіцієнта стоячої хвилі по напрузі (КСХН) для моделі пеленгаційної антени з ІЛА.

Далі за допомогою функцій Con_EPhi , Con_ETheta , PPC_EPhi , PPC_ETheta побудовані амплітудні діаграми направленості (ДН) антени з ІЛА на частоті 2.4 ГГц.

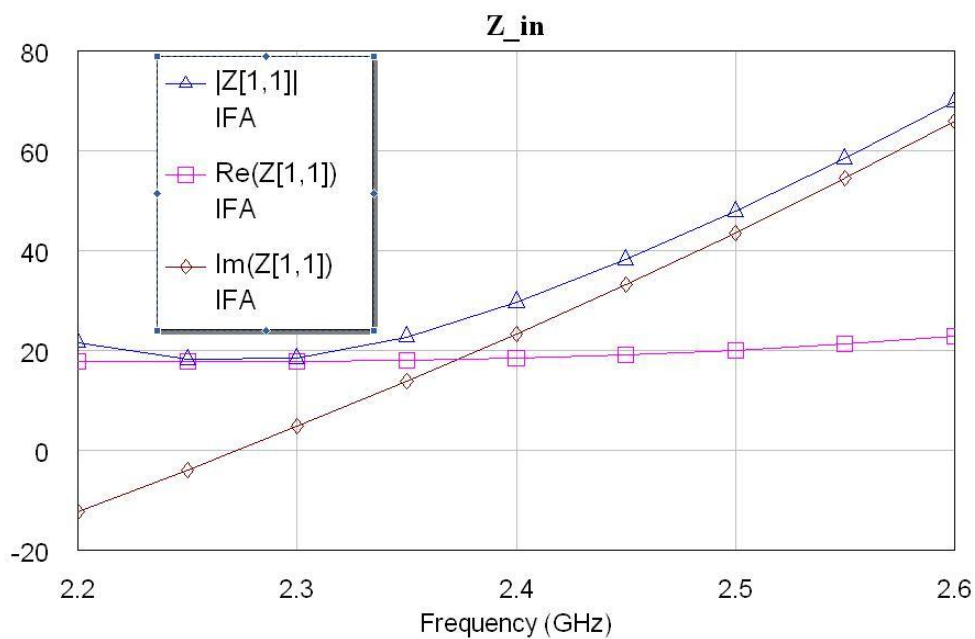


Рисунок 3.19 – Частотна залежність вхідного опору пеленгаційної антени

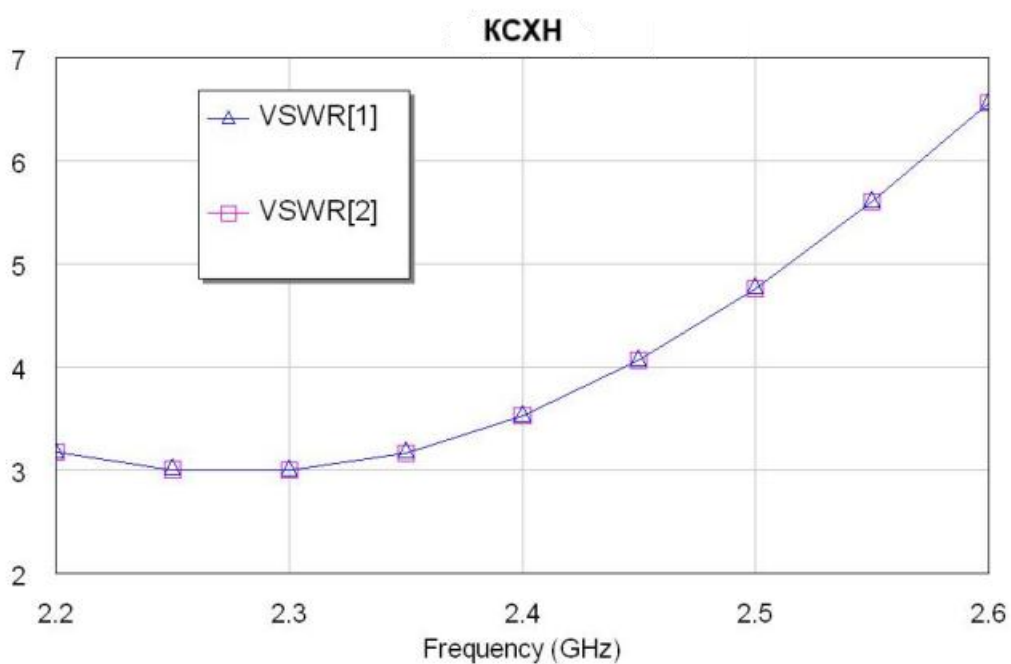


Рисунок 3.20 – Частотна залежність КСХН моделі пеленгаційної антени

На рис. 3.21 наведені діаграми спрямованості (ДН) моделі пеленгаційної антени з ІЛА у вигляді конічного вирізу з кутом місця $\theta = 90^0$, побудовані за допомогою функцій Con_EPhi і Con_ETheta по

складовим полів E_φ і E_θ відповідно. Так, при $\theta = 90^\circ$ кінцевий виріз перетворюється в горизонтальну площину.

На рис. 3.22 наведені ДН для моделі пеленгаційної антени з ІЛА в кутомісній площині, побудовані за допомогою функцій $PPC_E\Phi i$ і $PPC_E\Theta eta$. Особливість цих функцій в тому, що ДН будується у верхній півплощині при зміні θ від -90 до 90 град при фіксованому куті азимуту (в нашому випадку $\varphi = 0$). Як видно з рис. 3.22, ДН по складовим поля E_θ мають схожий вигляд, крім випадку, коли при $\theta = \pm 90^\circ$ значення ДН по складовій поля E_φ прагне до 0.

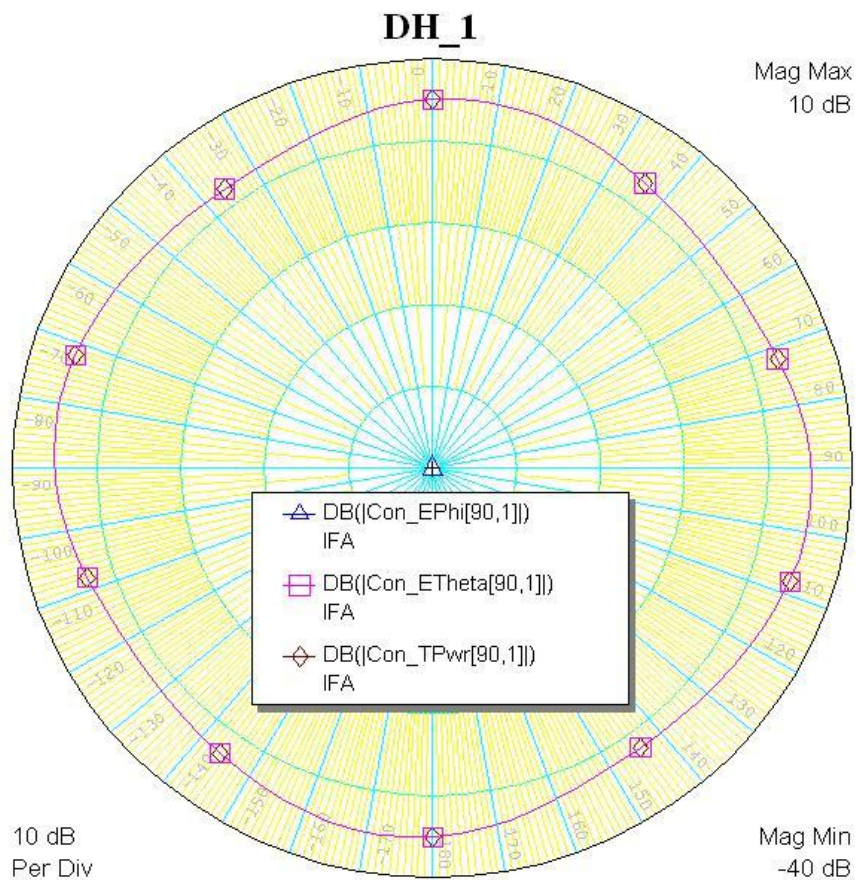


Рисунок 3.21 – ДН типу кінцевий виріз, побудовані за допомогою функцій $Con_E\Phi i$ і $Con_E\Theta eta$ для моделі пеленгаційної антени з ІЛА

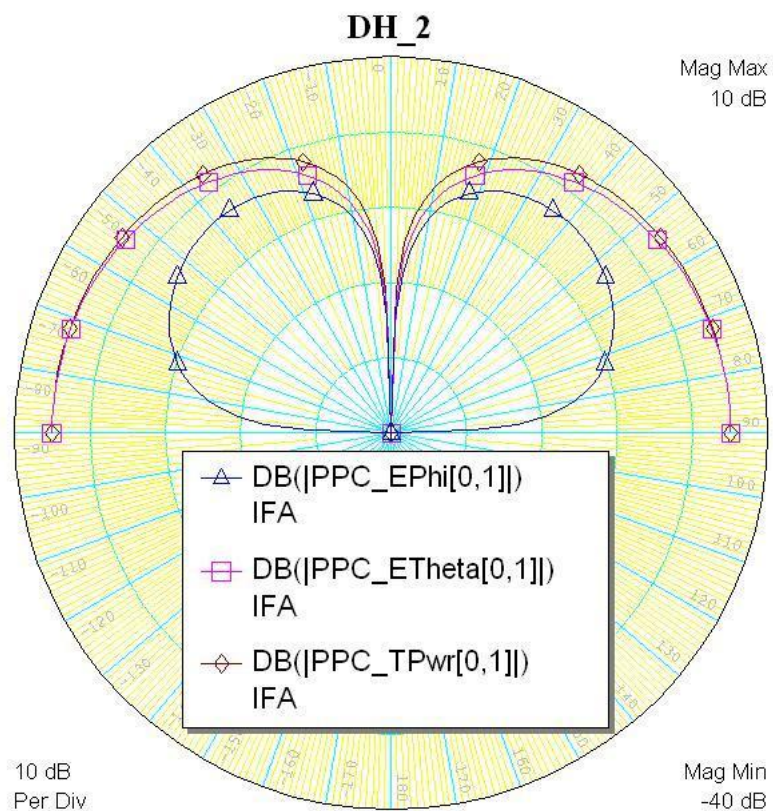


Рисунок 3.22 – ДН в вертикальній площині
для моделі пеленгаційної антени з ІЛА

На рис. 3.23 наведено розподіл струмів антен в режимі анімованого перегляду.

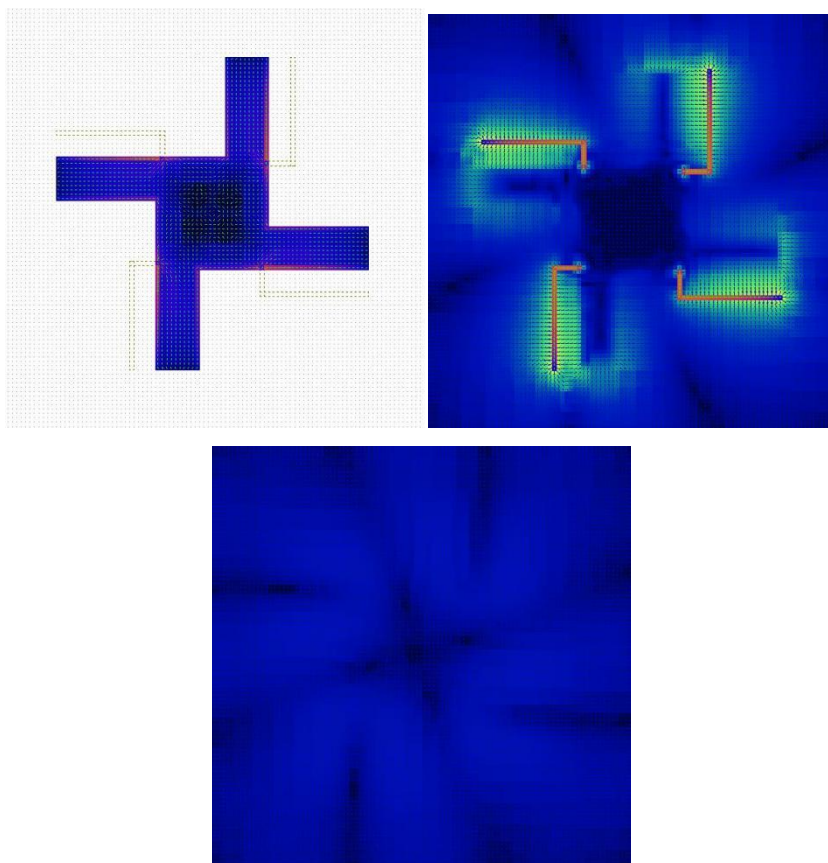


Рисунок 3.23 – Розподіл струмів антен ПЛА в режимі анімованого перегляду

Таким чином, проведене моделювання пеленгаційної антени з ПЛА, яка демонструє прийнятні результати щодо її узгодження і властивостям спрямованості.

Висновки до розділу 3

1. В якості антенних елементів чотирьохелементної пеленгаційної антенної системи обрана слабонаправлена друкована антена типу ПЛА, як така що задовольняє наступним вимогам: має малі габарити, достатньо технологічна, має гарне узгодження в заданій смузі частот, має необхідні спрямовані властивості (всеспрямованість), вертикальну або горизонтальну поляризацію.

2. Згідно завдання проведено проектування чотири елементної антенної системи в діапазоні частот ISM 2400–2483.5 МГц, для побудови

малогабаритних антенних систем радіопеленгаторів у складі переносних систем виявлення та пеленгації мікро- і міні- БПЛА. При виконанні роботи отримані такі результати:

- сформульовано завдання на проектування слабо спрямованої антени;
- з використанням сучасних засобів машинного проектування проведено проектування пеленгаційної антени та моделювання її параметрів.

ВИСНОВКИ

Переваги і специфічні властивості БПЛА - відносно невисока вартість, різноманітність виконуваних функцій, висока оперативність підготовки до застосування, економічність і простота в експлуатації, але водночас і труднощі контролю за ними призводять до підвищення масовості протиправних дій з їх використанням, що потребує адекватних рішень і дій на виникаючі й існуючі виклики і загрози з їх використанням.

Для виявлення малорозмірних і мало швидкісних БПЛА (мікро-БПЛА), широкого застосування, що є найбільш затребуваними в рішенні цивільних і військових завдань, оптимальним є поєднання методів пасивної локації та радіорозвідки. БПЛА можуть бути виявленими засобами радіотехнічної розвідки шляхом прийому і аналізу радіосигналів ліній зв'язку та управління, радіолокаційних висотомірів, постановників активних перешкод і радіолокаційних станцій. Слабким місцем БПЛА є вразливість його каналів зв'язку: сигнали GPS навігаторів, а також сигнали, що приймаються або передаються БПЛА, можна придушувати, перехоплювати і підміняти шляхом перехоплення управління.

Сучасна антенна система (АС) радіопеленгатора БПЛА складається з декількох антенних підсистем, зокрема пеленгаційні АС переважно реалізовані як кільцеві антенні решітки (АР), які мають багатоелементну структуру, де для найбільш оптимального налаштування апертури антени під робочу смугу частот використовуються широкосмугові (ШС) антенні елементи або вузькосмугові зі змінюваною електричною довжиною (з реконфігурацією).

При достатньому часі накопичення можна забезпечити виявлення будь-якого ШС сигналу з заданою якістю яке б низьке ВСШ не було на вході приймачів радіопеленгатора з кільцевою АР. Радіопеленгація на базі кільцевої антеної решітки міні- і мікро-БПЛА, які для передачі даних

використовують ППРЧ сигнали, дозволяє забезпечувати їх виявлення і контроль за їх діями.

Прикладами засобів радіоелектронного придушення БПЛА є станції радіорозвідки і постановки завад ARDRONIS фірми «Rohde & Schwarz», (Німеччина) та система пасивної локації радіочастотного випромінювання від бортових систем БПЛА "Drone Detector" від компанії «Aaronia» та ін.

Магістерська робота присвячена комплексним дослідженням, пов'язаним з розробкою і проектуванням пеленгаційної антени у вигляді кільцевої AP діапазону ISM 2400 МГц для роботи у складі комплексів радіомоніторингу та радіопеленгації БПЛА.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. В.М. Карташов, В.Н. Олейников, С.А. Шейко, С.И. Бабкин, И.В. Корытцев, О.В. Зубков Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // «Радіотехніка» Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник 2018, № 195, – с. 235-243.
2. Г. Горюнов, О. Неплюев Помехи против малоразмерных дронов // Журнал "Воздушно-космический рубеж", декабрь, 2017, 6 с.
3. М. Макушин Системы обнаружения радиоуправляемых БПЛА // Электроника наука технология бизнес №6 (00166), 2017, с. 82-88.
4. Ю.И. Савинов, С.М. Семченков, Д.А. Васильев, Е.А. Алешанов, О.А. Давиденко Оценка возможностей по пеленгации мини и микро-БЛА корреляционным методом с использованием кольцевой цифровой антенной решетки / Доклады и статьи ежегодной научно-практической конференции «Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами», г. Коломна, 2016. – с.30-35.
5. «Rohde & Schwarz» [Электронный ресурс]. – режим доступа: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ARDRONIS_bro_ru_5214-7035-18_v0600.pdf 26.11.2020. Заголовок с экрана: R&S ARDRONIS Противодействие радиоуправляемым дронам.
6. Sernia инжиниринг: Каталог товаров [Электронный ресурс]. – режим доступа: https://sernia.ru/news/2017/reshenie_dlya_radionablyudeniya_i_avtomaticheskogo_otslezhivaniya_traektorii_dronov/ 26.11.2020. Заголовок с экрана: Решение для радионаблюдения и автоматического отслеживания траектории дронов.
7. Лихограй В. Г., Крючкова Л.П., Стрельницкий А.А., Стрельницкий А.Е., Хорошко В.А., Цопа А.И., Шокало В.М. Производительность и

помехозащищенность радиоканалов систем абонентского радиодоступа: Под. ред. проф. В.М. Шокало, проф. В.А. Хорошко. [Текст] – Харьков: КП «Городская типография», 2011. – 220 с.

8. Слюсар В. Многодиапазонные антенны мобильных средств связи. [Текст] – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, №8, с. 90–96.

9. Слюсар В. Антенны RIFA для мобильных средств связи (многообразие конструкций). – Электроника: НТБ, 2007, №1, с. 64–74.

10. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР [Текст] – М.: Эко-Трендз, 2008. -278 с.