

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Система виявлення середніх БЛПА

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи СТМм-20-1
Сергієнко В.А.
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Системи, технології і
комп'ютерні засоби мультимедіа
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Карташов В.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Карташов В.М.

(прізвище, ініціали)

2021 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Сергієнко Вячеславу Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система виявлення середніх БПЛА

затверджена наказом по університету від " 08 " 11 2021 р. № 1675 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 08.12.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Виконати огляд і аналіз відомих методів і засобів виявлення безпілотних летальних апаратів. Обрати енергетичні і неенергетичні характеристики і параметри зондуючого радіолокаційного сигналу, в якості якого використовувати імпульсний сигнал. Забезпечити дальність виявлення середнього БПЛА - 25 км. Синтезувати схему аналого-цифрового перетворення, оброблення і виявлення радіолокаційного сигналу, захисту від завад. Розробити структурну схему радіолокаційної станції, реалізуючи запропоновані методи і алгоритми обробки сигналів.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1. Методи виявлення і спостереження БПЛА

2. Побудова структури РЛС виявлення БПЛА

3. Методи, алгоритми і пристрої обробки сигналу

Висновки

Перелік посилань

Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов'язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

1. Структурна схема системи виявлення БЛПА -1 арк.

2. Вибір оптимальної довжини хвилі - 1 арк.

3. Аналогове цифрове перетворення інформації - 3 арк.

4. Захист від активних перешкод - 1 арк.

5. Відображення інформації систем виявлення - 1 арк.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи (проекту)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	08.11.21–09.11.21	
2	Огляд існуючих методів	10.11.21–11.11.21	
3	Розробка структурної схеми	12.11.20–13.11.20	
4	Вибір оптимального зондуючого сигналу	14.11.21–15.11.21	
5	Вибір огляду простору	16.11.21–17.11.21	
6	Властивості аналого-цифрового перетворення	18.11.21-19.11.21	
7	Метод захисту від активних перешкод	20.11.21-28.11.21	
8	Графічна частина роботи	29.11.21-02.12.21	
9	Перевірка керівником	03.12.21-04.12.21	
10	Перевірка нормоконтролю	05.12.21-06.12.21	
11	Перевірка на академічний плагіат	07.12.21	
12	Перевірка зав. кафедрою, рецензування	08.12.21	

Дата видачі завдання _____ 08.11.2021 р. _____

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи (проекту) _____ проф. Карташов В.М. _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка випускної кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Система виявлення середніх БЛПА» 75 с., 3 табл., 32 рис., 5 дод., 19 джерел.

БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, РАДІОЛОКАЦІЯ, ВИЯВЛЕННЯ, ПРИЛАД, ПРИЙМАЧ, ЗАХИСТ, КОНТРОЛЬ.

Ціль роботи – синтез структури системи виявлення БЛПА. Підвищення ефективності виявлення та протидії активним перешкодам шляхом інтегрування сучасних методів захисту.

Об'єкт проектування – радіолокаційна система виявлення середніх безпілотних літальних апаратів.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне модулювання, статистична обробка даних, порівняння теоретичних і практичних даних.

У роботі проведено аналіз літератури за темою роботи, визначені основні вимоги до системи виявлення середніх безпілотних літальних апаратів, що розробляється. Синтезовано структурну схему радіолокаційної системи, обґрунтовано вибір зондуючого радіолокаційного сигналу у вигляді послідовності імпульсних сигналів малою шпаруватістю, розроблені основні алгоритми функціонування системи та визначені її основні енергетичні параметри.

Отримані в роботі результати можуть бути використані на практиці при проектуванні систем радіолокаційного зондування повітряного простору і виявлення БПЛА.

ABSTRACT

Explanatory note of the final qualification work of the master on the topic " BLPA detection system " 75 P., 3 tables., 32 fig., 1 adj., 19 sources.

UNMANNED AERIAL VEHICLE, RADAR, DETECTION, INSTRUMENT, RECEIVER, PROTECTION, CONTROL

The aim of the work is to synthesize the structure of the BLPA detection system. Improving the effectiveness of detecting and countering active interference by integrating modern protection methods.

The design object is a radar detection system for medium-sized unmanned aerial vehicles.

Research methods-theoretical analysis, numerical calculations, mathematical modeling, statistical data processing, comparison of theoretical and practical data.

The paper analyzes the literature on the topic of the work, defines the main requirements for the developed detection system for medium-sized unmanned aerial vehicles. The block diagram of the radar system is synthesized, the choice of a probing radar signal in the form of a sequence of pulse signals with a small duty cycle is justified, the main algorithms for the functioning of the system are developed and its main energy parameters are determined.

The results obtained in this paper can be used in practice in the design of systems for radar sensing of airspace and UAV detection.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів	7
Вступ.....	8
1 Методи виявлення і спостереження БЛПА.....	10
1.1 Аналіз об'єктів виявлення.....	10
1.2 Аналіз методів виявлення СБЛА.....	13
1.2.1 Аналіз радіолокаційного методу виявлення СБЛА.....	18
1.3 Аналіз існуючих СБЛА.....	20
1.4 Вимоги виявлення СБЛА.....	22
1.5 Аналіз аналогічних систем виявлення БЛПА.....	23
1.6 Постановка завдання.....	33
2 Побудова структури РЛС виявлення БЛПА.....	35
2.1 Розробка структурної схеми системи виявлення СБЛА.....	35
2.2 Вибір довжини хвиль.....	36
2.3 Вибір виду огляду простору.....	42
2.4 Вибір виду сигналу.....	48
3 Методи, алгоритми і пристрої обробки сигналу.....	54
3.1 Аналого-цифрове перетворення сигналів системи виявлення БЛПА.....	54
3.2 Захист від перешкод.....	64
3.2.1 Використання компенсаційної антени.....	65
3.2.2 Використання «нулів» діаграми спрямованості.....	67
3.2.3 Поляризаційний метод.....	67
3.3 Індикатори станції.....	68
Висновки.....	71
Перелік джерел посилань.....	73
Додаток А.....	76
Додаток Б.....	84

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АПЧ – автоматичне підстроювання частоти;

АТО – антитерористична операція;

АЦП – аналогове цифровий перетворювач;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ЕПВ – ефективна поверхня відображення;

ЕПР – ефективна площа розсіювання;

ЗС – зондуючий сигнал;

ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема;

РЕБ – радіоелектронна боротьба;

РЛС – радіолокаційна станція;

РТВ – радіотехнічні війська;

СБЛА – середні безпілотні літальні апарати;

ТТХ – тактико-технічні характеристики;

ФАР – фазова антенна решітка.

ВСТУП

Зростаюче з кожним роком значення БПЛА в сучасному світі сприяє безперервним роботам з їх удосконалення. Але прогрес в розвитку безпілотних літальних апаратів може використовуватися як для поліпшення задоволення потреб людини (повітряна відеозйомка, доставка вантажів, поштові потреби і т.д.) так і для вчинення зловмисниками несанкціонованих дій - перетину державного або часного кордонів, шпигунства, диверсій і т.д.

Постійно збільшується номенклатура і відносно низька вартість БПЛА. Можливість вирішення БПЛА широкого кола завдань, включаючи розвідувальні і бойові, зробили безпілотні літальні апарати потенційною загрозою для різних об'єктів цивільного і військового призначення [3]. Тому протягом останніх 15-20 років у всіх розвинених зарубіжних країнах велика увага приділяється розробці заходів протидії безпілотним літальним апаратам. Нові завдання, поліпшення тактико-технічних характеристик БПЛА, в тому числі, зростання максимально можливої висоти та тривалості польоту, ускладнює завдання по їх виявленню [9].

У зв'язку з цим, виявлення середньо розмірних безпілотних літальних апаратів (СБЛА) є пріоритетним завданням при створенні систем з протидії БПЛА. Темою магістерської роботи є розробка радіолокаційної станції виявлення середніх безпілотних літальних апаратів.

Ціль роботи – розробка структури радіолокаційної станції виявлення СБЛА, вибір основних технічних параметрів системи, синтез ефективних технічних рішень і пристроїв, що входять до її складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технічне завдання та існуючі сучасні рішення;
- проаналізувати сучасні СБЛА та їх основні характеристики і міри протидії виявленню;
- дослідити сучасні методи виявлення літальних апаратів та їх ефективність;

- розробити структуру радіолокаційної станції виявлення СБЛА, здійснити вибір основних технічних параметрів системи;
- оформити пояснювальну записку керуючись методичними вказівками до підготовки випускної кваліфікаційної роботи магістра [1] та згідно ДСТУ 3008-2015 [2].

1 МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ І СПОСТЕРЕЖЕННЯ БЛПА

1.1 Аналіз об'єктів виявлення

Останнім часом безпілотні літальні апарати (БЛПА) використовуються все частіше у різних сферах діяльності людини і це нашкоджує на роздуми о безпеці та моніторингу БЛПА у повітряному просторі (табл. 1.1). За розмірами та технічними характеристиками можливо виділити середні БЛПА («Міні» та «Міді») як універсальні та найбільш розповсюджені БЛПА [3].

Таблиця 1.1 – Типи БЛПА

Тип БЛПА	Вага, кг	Габарити, м ³	Час польоту, год	Макс. Висота, км
«Микро»	≤5	≤0,2	1-4	1-2
«Міні»	≤150	0,3	3-5	3-5
«Міді»	≤160	0,33	3-5	3-5
«Максі»	≤1000	2-12	8-36	120
«Супермаксі»	≤15000	≥20	36-48	

Переважає більшість літератури з теми ідентифікації безпілотних літальних апаратів зосереджена на обробці зображень і відео аналітики на основі навчання класифікаторів, а саме алгоритмів машинного навчання, що живляться відео послідовностями, зібраними з різних типів камер.

Як відомо на сьогоднішній день існує велика кількість типів БЛПА, різної конструкції, призначені для безліч різних завдань [8].

В даному розділі ми з вами розглянемо найвідоміші з них, які придбали найбільшу популярність і довели свою перевагу щодо інших типів.

Розрізняють такі типи БЛПА, що відрізняються конструкцією і принципом роботи, зльоту/посадки і призначення. Розглянемо нижче кожен з цих типів.

БПЛА літакового типу (рис.1.1).



Рисунок 1.1 – БПЛА літакового типу Proteus

Такий тип апаратів відомий також як БПЛА з жорстким крилом (англ.: fixed-wing UAV). Підйомна сила у них створюється аеродинамічним способом за рахунок напору повітря, що набігає на нерухоме крило. Апарати такого типу, як правило, відрізняються великою тривалістю польоту, великою максимальною висотою польоту і високою швидкістю.

Мультироторні БПЛА(рис.1.2).



Рисунок 1.2 – БПЛА мультироторного типу Трикоптер

Одним з найбільш масових БПЛА є мультикоптер. До цієї групи належать БПЛА, що мають більше двох несучих гвинтів. Реактивні моменти врівноважуються за рахунок обертання несучих гвинтів попарно в різні боки або нахилу вектора тяги кожного гвинта в потрібному напрямку. Безпілотні мультикоптери, як правило, відносяться до КЛАСІВ міні - і мікро-БПЛА.

БПЛА аеростатичного типу(рис.1.3).



Рисунок 1.3 – БПЛА аеростатичного типу Kisong

БПЛА аеростатичного типу (blimps) – це особливий клас БПЛА, в якому підйомна сила створюється переважно за рахунок архімедової сили, що діє на балон, заповнений легким газом (як правило, гелієм). Цей клас представлений, в основному, безпілотними дирижаблями.

Дирижабль (від фр. dirigeable-керований) - літальний апарат легше повітря, що представляє собою комбінацію аеростата з рушієм (зазвичай це гвинт (пропелер, імPELLер) з електричним двигуном або ДВС) і системи управління орієнтацією завдяки якій дирижабль може рухатися в будь-якому напрямку незалежно від напрямку повітряних потоків.

Безпілотні конвертоплани і гібридні моделі(рис.1.4).



Рисунок 1.4 – Беспілотний конвертоплан Tiltrotor

Конвертоплан (англ.: *convertiplane, heliplane*) – літальний апарат з поворотними гвинтами, які на зльоті і при посадці працюють як підйомні, а в горизонтальному польоті-як тягнуть (при цьому в польоті підйомна сила забезпечується крилом літакового типу). Таким чином, цей апарат поводить себе як вертоліт при зльоті і посадці, але як літак в горизонтальному польоті. Великі гвинти конвертоплану допомагають йому при вертикальному зльоті, проте в горизонтальному польоті вони стають менш ефективними в порівнянні з гвинтами меншого діаметру традиційного літака.

1.2 Аналіз методів виявлення СБЛА

Поява безпілотних літальних апаратів і їх широке використання останнім часом створили проблему для існуючих радіолокаційних систем, які традиційно спеціалізувалися на виявленні та відстеженні цивільних і військових літаків і вертольотів [9]. Крім того, конструкції безпілотних літальних апаратів тепер включають функції скритності для подальшого

мінімізації виявлення, що є доповненням до використання композитних матеріалів. Це призвело до того, що навіть великі безпілотні літальні апарати тепер мають RCS птиці, для виявлення якої традиційні радіолокаційні системи не призначені. Щоб ускладнити завдання виявлення традиційними радіолокаційними системами, безпілотний літальний апарат рухається більш випадковим чином, ніж традиційні літаки, і на малих, середніх та великих висотах з різною швидкістю.

Розуміючи великі технологічні складнощі при виявленні СБЛА доводиться полишити класичні методи виявлення повітряних апаратів, та сфокусуватися на комбінуванні існуючих методів моніторингу повітряного простору.

Розглянемо такі методи виявлення: оптичний, акустичний, радіолокаційний та лазерний.

Оптичний метод базується на обробці зображень і відео аналітиці на основі навчання класифікаторів, а саме алгоритмів машинного навчання, що живляться відео послідовностями, зібраними з різних типів камер. Ціль полягає в тому, щоб витягти деякі особливості для різних типів класифікацій : категорія безпілотних літальних апаратів (з нерухомим крилом, з одним ротором, з декількома роторами); відмінність між безпілотними літальними апаратами і птахами, які є найбільш схожими цілями за розміром і радіолокаційним перерізом (RCS); оцінка наявності будь-якої корисної навантаження, яка впливає на RCS всієї мети [5]. Основним обмеженням цієї технології для первинного виявлення є розмір таких цілей, які можна легко сплутати з фоном або відрізнити від птахів. Крім того, камери серйозно впливають на умови навколишнього середовища, такі як низький рівень освітлення, змінна освітленість та тіні, або навіть проста закупорка об'єктива, яка повністю виводить систему з ладу; вночі та в цілому в темних областях також потрібні інфрачервоні камери, які, як правило, мають меншу роздільну здатність та діапазон, а також більш високу вартість. У зв'язку з усіма цими міркуваннями підходи, засновані на відео, дуже корисні в хороших погодних

умовах і на коротких відстанях, особливо на етапах перевірки і класифікації після того, як вже було оголошено про виявлення.

Перш ніж поглиблюватися в деталі радіочастотних підходів, зокрема заснованих на активних датчиках (радарях), варто згадати, що акустичні датчики також розглядалися як життєздатна технологія для визначення присутності безпілотних літальних апаратів на основі застосування методів статистичної обробки масивів [10]. Більш конкретно, використання аудіо сенсорів призначене для уловлювання звуку як двигунів, так і швидко обертових пропелерів (для безпілотного літального апарату з одним / декількома роторами), щоб відрізнити ці види цілей від інших, особливо птахів. Через розмір цілей і навколишнього шуму діапазон чутливості цих датчиків і, отже, їх можливості виявлення дуже обмежені. Однак вони все ще можуть бути корисними для другого етапу ідентифікації, тобто перевірки: фактично, як тільки було оголошено про виявлення спільної мети, можна витягти звукову сигнатуру, щоб або підтвердити отриману мету, або оголосити помилкову тривогу.

Радарні датчики залишаються важливим компонентом систем спостереження безпілотних літальних апаратів. Як відомо, цей підхід по суті заснований на електромагнітному принципі зворотного розсіювання, яке виникає, коли об'єкт освітлюється променем радара. Основна складність у випадку невеликих безпілотних літальних апаратів полягає в тому, що ймовірність виявлення сильно залежить від радіолокаційного перетину цілей, яке, як уже згадувалося, досить мало для безпілотних літальних апаратів, які в основному порожні і зроблені з пластику [14]. З цієї причини були розроблені нові радіолокаційні установки, які намагаються використовувати зворотне розсіювання від обертових деталей, таких як пропелери і ротори, для оцінки мікро-доплерівських сигнатур. Спеціально для третього етапу класифікації мікро-доплерівський аналіз може надати корисну інформацію про кількість пропелерів і роторів (одно-/багато роторний). Крім того, у

випадку помилкової тривоги через птах частотно-часовий аналіз може забезпечити точне розпізнавання.

Лазерний метод заснований на використанні лазера як проміню вузького напрямлення. Справедливо можна зазначити що основу він бере одразу як з оптичного методу (алгоритми розпізнавання дуже схожі з оптичним методом) так і з радіолокаційного (по своїй суті використовується хвиля з дуже вузькою діаграмою направленості). До переваг можливо віднести що точність розпізнавання вище ніж у оптичного методу через відсутність впливу освітлення на результати, та менш вразливий до активних перешкод через вузький канал сигналу. До недоліків все ж потрібно віднести велику залежність від погодних умов, маленьку відстань виявлення та через вузький промінь виявлення використання подібного методу робить його нерентабельним у черговому режимі. Тож підводячи підсумок лазерний метод оптимально використовувати у комбінації з іншими методами за для збільшення точності вимірювання.

Метою даної роботи є ідентифікація безпілотних літальних апаратів на основі радіолокаційних датчиків. На додаток до завдання класифікації основна увага приділяється першій фазі процесу ідентифікації, тобто фазі виявлення. Це було набагато менш вивчено в порівнянні з етапом класифікації, де в більшості випадків передбачається наявність мети заздалегідь. Порівняння різних технологій, прийнятих в літературі, коротко представлено в таблиці 1.2, з особливим акцентом на тип підходів, використовуваних для визначення присутності безпілотних літальних апаратів, а також на основних плюсах і мінусах кожної технології [15].

Таблиця 1.2 – Порівняння технологій виявлення СБЛА

Технологія	Підхід	Переваги та недоліки
Оптичний	Одна або кілька камер для виконання ідентифікації за рухами дрону	А) Дуже точний на коротких дистанціях; Б) Підходить для перевірки та класифікації; В) Чутливий до слабкого зовнішнього освітлення, змінного освітлення та затемнення; Г) Важко відрізнити дрони від інших невеликих літаючих об'єктів на великій відстані.
Звуковий	Звук, створений літаючими безпілотниками, які використовуються для ідентифікації	А) Можливо відрізнити дрони від птахів за акустичними ознаками; Б) Легко перевірити; В) Ефективний тільки на дуже коротких дистанціях.

Продовження таблиці 1.2 – Порівняння технологій виявлення СБЛА

Технологія	Підхід	Переваги та недоліки
Радіолокаційний (пасивний)	Відео потік вниз по лінії зв'язку або електромагнітного розсіювання умовних радіочастотних сигналів	А) Дуже ефективний для виявлення дронів; Б) Можлива локалізація дистанційного пілота; В) Підвищена частота помилкових тривог через перешкоди; Г) Неefективний для автономних дронів.
Радіолокаційний (активний)	Зворотне розсіювання радіочастотного	А) Стійкий до погодних умов і умов освітлення; Б) Дуже ефективний для виявлення

	сигналу, що використовується для виконання доплерівського відстеження та ідентифікації на основі відгуку	та класифікації дронів; В) Ймовірність виявлення сильно залежить від перерізу радару.
Лазерний	Подібний до радара, але використовується зворотне розсіювання лазерного світла	А) Чутливий до поганої видимості через погоду, смог або пряме сонячне світло; Б) Дуже ефективний для виявлення дронів; В) Основна класифікація можлива на основі розміру цілі, але трутнів і птахів неможливо розрізнити;

1.2.1 Аналіз радіолокаційного методу виявлення СБЛА

Серед методів виявлення БПЛА радіолокаційний метод можна виділити як найбільш перспективний [17]. Радіочастотні сигнали стійкі до погодних умов і умов освітлення і можуть забезпечувати покриття на середніх і великих відстанях. Вони є підходящим інструментом для обробки етапу первинного виявлення, який запускає весь процес ідентифікації. Найбільш важливим пристроєм для активного радіочастотного виявлення безпілотних літальних апаратів є радарний датчик, але також актуальні пасивні технології. Зокрема, використання спектрального зондування може бути відмінним рішенням для виявлення безпілотного літального апарату, коли між дроном і його контролером існує передача по висхідній/низхідній лінії

зв'язку. Це також може дозволити локалізувати віддаленого пілота, що важливо з точки зору відповідальності. Однак у цьому підході є два обмеження, пов'язані з частиною спектру, на якій здійснюється зв'язок між контролером і безпілотним літальним апаратом, і можливістю автономного (заснованого на GPS) режиму наведення. Дійсно, зв'язок з безпілотниками зазвичай використовує промисловий, науковий і медичний (ISM) частотний спектр, в якому знаходяться багато інших систем (включаючи Wi-Fi і деякі технології фіксованого бездротового доступу); це означає, що смуга зв'язку переповнена, що збільшує ризик помилкових тривоги. Щоб впоратися з цією проблемою, в декількох роботах розглядалася тема аналізу мережевого трафіку [6]. Тим не менш, пасивне виявлення абсолютно неефективне у випадку безпілотних літальних апаратів, що літають в повністю автономному режимі, що може бути особливо характерно для загроз безпеки. Лазерні сканери (лідари) також розглядаються для активного виявлення в середовищах, де не можна використовувати радари. У цьому випадку використовується зворотне розсіювання лазерного світла, яке, однак, чутливе до поганої видимості через погоду, смогу або прямих сонячних променів. У нормальних погодних умовах лідари можуть бути дуже ефективними для виявлення безпілотних літальних апаратів і базової класифікації, а саме на основі розміру цілі, яка може займати кілька осередків в результаті тонкого кутового дозволу лазерів (дуже вузький промінь). Однак цілі з однаковими розмірами, зокрема дрони і птахи, невиразні. Таким чином, лідари можна вважати додатковою технологією по відношенню до радіочастотних датчиків.

Тож можливо підвести підсумок що радіолокаційний метод виявлення СБЛА має переваги у дальності та висоті спостереження повітряного простору, стійкістю перед погодними умовами, точністю визначення координат цілі та можливістю спостереження за декількома цілями.

До недоліків можливо віднести у першу чергу велику собівартість методу, деяку неточність при виявленні малих БПЛА (через велику схожість

з ЄПР птиці), малу перешкодозахищеність перед об'єктами з великою металізованістю (міські споруди) та з суттєвими перепадами висоти місцевості

1.3 Аналіз існуючих СБЛА

При виявленні СБЛА розглядаються різні види безпілотників. Опираючись на дослідження ХНУРЕ [4], ми можемо віднести до СБЛА безпілотними типу «Міні» та «Міді». До основних характеристик можливо віднести масу БЛПА, швидкісні характеристики, тривалість польоту, габаритні характеристики та матеріал виробу. Останні поділяються на:

- металеві: відношення металу до інших матеріалів 80%;
- металізовані: відношення металу до інших матеріалів 50%;
- композитні: відношення металу до інших матеріалів менше 30%;
- неметалеві: відношення металу до інших матеріалів менше 5%.

Раніше найбільш розповсюдженими, через велику масу периферійного обладнання, були металеві та металізовані СБЛА [5]. Їх маса досягала від 25 до 110 кг, а висота польоту досягала від 100 до 1000 м(рис.1.5).



Рисунок 1.5 – Середні БЛПА на час 2010 року

На сьогоднішній день як показали бойові дії у зоні антитерористичної операції (АТО) сучасні БЛПА найбільш поширено складаються з композитних матеріалів, маса зменшилася до 3-25 кг (в залежності від

призначення), висота польоту перевищує 3000м (рис.1.6). Це формує деякі складнощі у виявленні та своєчасній протидії БЛПА.



Рисунок 1.6 – Сучасні СБЛА «Форпост» та «Орлан»

Класичні методи виявлення повітряних об'єктів РТВ ППО при використанні радіолокаційних станцій (РЛС) та висотомірів раніше виявляли СБЛА але наштотувалися на проблеми з виявленням точних координат через маленькі розміри та нестандартну модель поведінки польоту, що у свою чергу додалося апаратно збільшенням роздільної здатності та прискоренням обертання антени. У результаті ціль чітко відображалася на радарі і більш детально показує маршрут [6].

На сьогоднішній день СБЛА вдаються до таких маневрів як політ біля великого джерела пасивних перешкод (ліси, гори, перепади місцевості) або навпаки піднімаються вище основного променя РЛС через що їх можна сплутати з метеоутвореннями(рис.1.7).

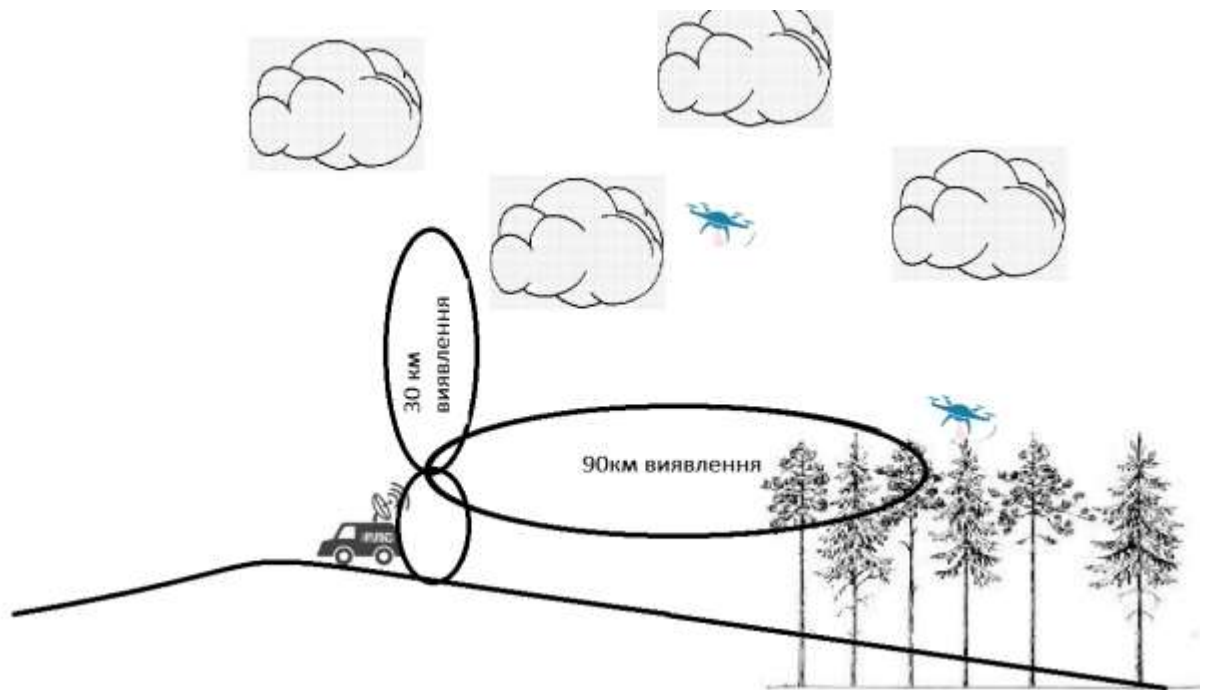


Рисунок 1.7 – Схема поведінки сучасних СБЛА

Також при використанні РЛС з'являється проблема визначення висоти. З цим допомагає впоратися радіовисотоміри [7]. РЛС визначає відстань до літака, швидкість і напрямок його руху. Пристрій управління висотоміром обчислює кутову швидкість літака відносно станції і починає обертати антену висотоміра з відповідною швидкістю. Одночасно антена ходить вгору-вниз, скануючи простір вузьконаправленим променем. Таким чином обчислюється кут місця літака. Найпростішими перетвореннями можна визначити висоту над землею. Трьох координатної РЛС з тією ж метою використовують велику кількість променів, випромінюваних декількома передавальними антенами. Такий метод знаходження висоти менш точний, але після первинної обробки разом з координатами літака видається і його висота. Але однією з переваг СБЛА є можливість зміни швидкості у час перельоту і тим самим протидіяти визначенню висоти.

1.4 Вимоги виявлення СБЛА

Виявлення СБЛА повинні проводитися для контролю повітряного простору і визначення положення діючих апаратів [18].

Встановлюються наступні вимірювання і розраховуються наступні величини в залежності від тимчасових характеристик БЛПА:

- Кутова швидкість V_a - для виявлення траєкторії руху СБЛА;
- Кутове прискорення ϵ_a - для виявлення зміни траєкторії та визначення кінцевої точки призначення;
- Дальність до цілі L та азимут цілі β – для визначення висоти цілі;
- Ефективна поверхня відображення(ЕПВ) S_e – для визначення об'єму цілі і класифікації за призначенням;
- Наявність об'ємно розподільних об'єктів біля цілі – для зменшення помилок у встановленні об'єму цілі.

Усі величини отримуються и розраховуються у реальному часі для актуальності даних при оперативному реагуванні на появу, або діяльність СБЛА.

Отримані величини аналізуються через 3-5 випадків виявлення на наявність закономірностей поведінки і алгоритмів протидії виявленню.

1.5 Аналіз аналогічних систем виявлення БЛПА

У нашому випадку ми зробимо основний акцент на радіолокаційні станції(РЛС), як найбільш близькі до рішення задачі з виявлення БЛПА. РЛС це складний радіотехнічних пристрій котрий складається з таких трактів та систем:

- Антено-фідерна система: антена, високочастотний струмозмінювач, антенний комутатор; високочастотний дільник потужності; високочастотні фідери; щогловий пристрій.
- Передавальний пристрій: високовольтний випрямляч, модулятор, блок зарядних кенотронів, генератор надвисокої частоти.

- Прийомний пристрій: широкосмуговий підсилювач високої частоти, приймач.
- Система автоматичного підстроювання частоти (АПЧ): АПЧ приймача, канал підсилювач АПЧ, автомати перебудови на каналі надвисокої частоти.
- Система перебудови станції за частотою: органи перебудови пультів управління.
- Система захисту від пасивних перешкод: блок когерентного гетеродина, блок потенціалоскопів, блок підсилення та комутації.
- Хронізуючий пристрій: хронізатор, калібратор, формувач азимутальних імпульсів.
- Індикаторні пристрої: блок горизонтальної розгортки, блок вертикальної розгортки, відео підсилювач, блок електронно-променевої трубки, блок ехо-сигналів, блок сигналів зображення, індикатор контролю.
- Система обертання і нахилу антени: привід обертання антени; блок комутації системи, блок електромашинного підсилювача, привід нахилення.
- Система передачі азимута: блок управління візором виносного індикатора кругового огляду, блок сельсинів-датчиків; блок сельсинів-приймачів.
- Система управління й сигналізації: апаратні пульти управління, виносні пульти управління.

До комерційних варіантів систем виявлення та протидії СБЛА відносяться такі системи як ZJ-TY1811P, CPB-3080-HGA, SR223 [8].

ZJ-TY1811P (рис.1.8) за ціною 67 тисяч доларів США це розподілений UAV jammer підходить для захисту площі щодо фіксованих місць діяльності. Таких, як установи, відділ по роботі з корекціями, важливі партійні та державні органи, нафтові родовища, нафтопереробні підприємства, науково-дослідні установи, космічні бази, гідроелектростанції, атомні електростанції, склади небезпечних вантажів та інші конфіденційні одиниці і важливі

об'єкти; або деякі людні місця, такі як стадіони, мальовничі місця і школи. Кут перешкод обладнання може бути обраний від $45^\circ \sim 180^\circ$, і радіус перешкод може досягати більше 4 км. ZJ-TY1811 може бути оснащений портативним акумулятором і штативом для мобільного використання з витримкою 2-3 години, і швидко побудувати віялоподібний тимчасовий простір для захисту БПЛА з радіусом Управління більше 4 км. У системі реалізована можливість перемикання форми сигналу з імпульсного, (черговий режим) де радіохвиля зондує повітряний простір раз 2 секунди, на постійний сигнал(режим "вторгнення") де стає можливим спостерігати за "порушником повітряного простору" в реальному часі з мінімальними затримками в часі.



Рисунок 1.8 – Система протидії та виявлення СБЛА ZJ-TY1811

Антенa виконана по методиці IsoLOG 3D 160 RF-Tracking Array (680MHz to 6GHz) (рис.1.9) зі зміною форми, що з одного боку здорожує виробництво та ускладнює або робить неможливим можливість ремонту, а з

іншого боку така технологія перешкодостійка та підсилює власний сигнал за рахунок одночасного випромінювання сигналу [4].

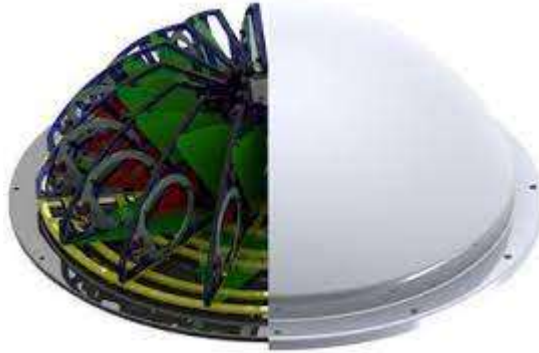


Рисунок 1.9 – Антена IsoLOG 3D 160 RF-Tracking Array у розрізі

До переваг даної системи можливо віднести круговий діапазон спостереження (360 градусів), широкий частотний діапазон (0,9Гц-5,9Гц), можливість корегування на інші частотні діапазони (0,3Гц-0,6Гц), стійкість перед перепадами температур (-35/+55) та можливість створення активних перешкод керування БЛПА на відстані до 3 км.

До негативних моментів можливо віднести створення пасивних перешкод при наявності у зоні спостереження споруджень з високою металізованістю покриття, низьку перешкодозахищеність та малу живучість антени (у разі потрапляння каменю або граду виходить зі строю).

СРВ-3080-HGA (рис.1.10) вартістю 4,5 тисячі доларів США це система автоматичного виявлення безпілотників. Використовує комбінацію акустичних даних, аналіз відео потоку і даних з ПЧ-сенсора, даних про наявність Wi-Fi-сигналу і сигналу на типових частотах каналу управління для виявлення безпілотників в "охоронюваному" сегменті простору. Відрізняє БЛПА від звичайних літаків і птахів [15]. Після виявлення веде відеозапис, а також аналіз того, що робить БЛПА. Робить знімок, намагається визначити модель БЛПА і відсилає знімок на задану адресу електронної пошти. Може поставлятися з опціями для радіоелектронної боротьби з БЛПА. "Веде"

виявлений дрон на відстанях до 490 метрів. У системи реалізована можливість перемикання форми сигналу з імпульсного, (черговий режим) де радіохвиля зондує повітряний простір раз 2,5 секунди, на постійний сигнал(режим "вторгнення") де стає можливим спостерігати за "порушником повітряного простору" в реальному часі з мінімальними затримками в часі. Антена в даній системі є омні-гратчастою (рис.1.10.б) об'єднаної ковпаком який у свою чергу є одночасно і фільтром сигналу і синхронізатором вихідних радіохвиль.

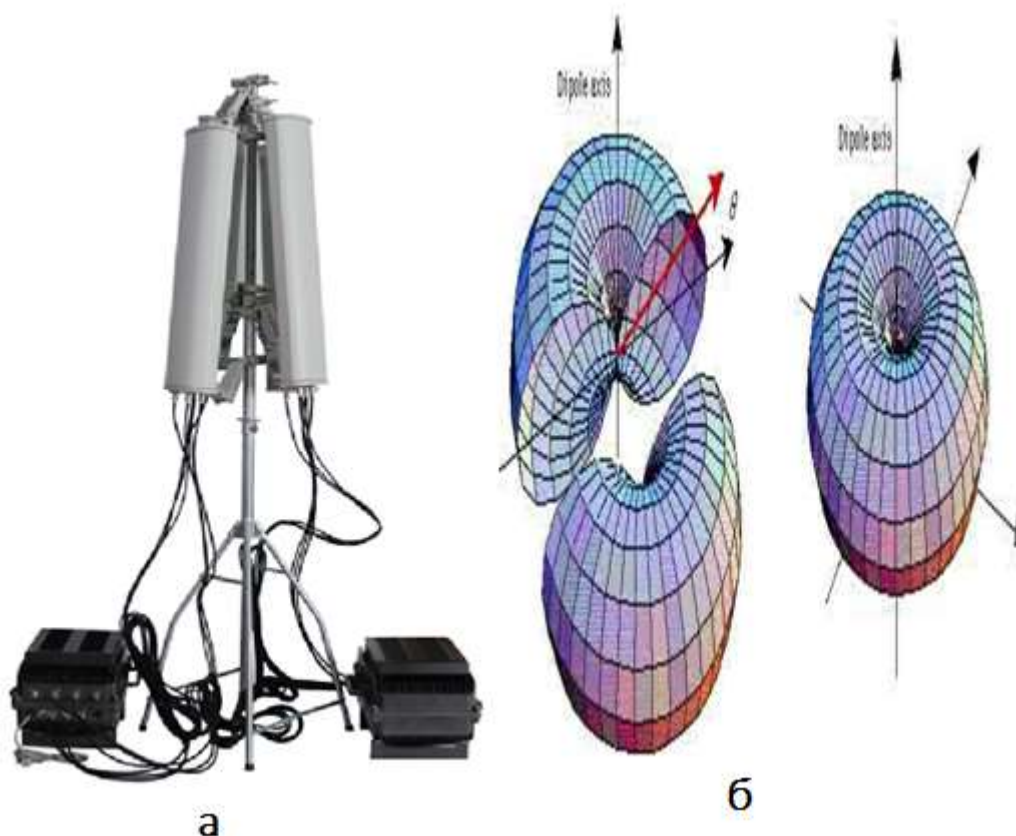


Рисунок 1.10 - Система виявлення СБЛА: а) CPB-3080-HGA у повній комплектації; б) схема випромінювання омні-антени

До переваг даної системи можливо віднести перешкодозахищеність при пасивних перешкодах на малих дистанціях (100-1000м фільтрує більше 75% перешкод від корисного сигналу), можливість дистанційного керування (до

40м через пульт керування), висока ізоляція кожного окремого модулю, можливість використання при роботі високих частот (850МГц-2100МГц) та порівняно з іншими системами і станціями низьку ціну.

До недоліків можливо віднести що при роботі з високими частотами зростає і енергоживлення (з 220В до 360В), низький діапазон виявлення (до 20км) та відсутня можливість тонкого корегування на малих відстанях.

SR223 (рис.1.11) вартістю 35 тисяч доларів США радар в основному складається з 1 радарного масиву, 1 інтегрованого блоку управління і 1 поворотного столу [13]. Він використовується для виявлення, оповіщення та індикація мети середніх цивільних безпілотних літальних апаратів в таких областях, як в'язниці, виставок, а також військові бази. Інформація про траєкторію, такий як положення, відстань, висота і швидкість цілі з урахуванням. В системі виявлення цілі йде за допомогою використання імпульсного сигналу (0,2 імпульси на секунду), з високою частотою випромінювання, і обертання антени що в результаті дозволяє регулювати точність виявлення швидкістю обертання антени. Антена йде суцільного типу і розповсюджує хвилі по трапеції що забезпечує більш широкий сектор видимості.



Рисунок 1.11 – Система спостереження та виявлення СБЛА SR223

До переваг даної системи можна віднести централізованість системи у середині радару що відкидає можливість несправності у разі виходу зі строю окремого модулю [8]. Рівень огляду круговий (360 градусів з нахилом антени 30 градусів), висока точність спостереження (точність відстані до 10м, точність висоти за нахилом до 1 градусу) та швидкість передачі інформації (0,2 рази/с). Також є можливість дистанційного отримання даних моніторингу.

До недоліків можливо віднести дуже маленьку відстань гарантованого виявлення (до 2 км), та малий рівень «пелюстки» через що для ефективного покриття поверхні хоча на 1 будівлю потрібно або раз у 5 хвилини розгортати (що не передбачуване конструкцією та технологією) або ставити декілька антен (що збільшує стогову системи).

У зоні (АТО) зі сторони українських військ на озброєні стоять РЛС переважно вітчизняних виробників для виявлення перетину закритого повітряного простору та протидії ймовірному супротивнику. Серед них «Панцир1» (модифікація 19к6) (рис.1.12.а), «ТОР» (модифікація 9к330) (рис.1.12.б), П-18, 5н84А, 44ж6, 35д6 та ін.



Рисунок 1.12 – РЛС ППО на озброєні українських військ:

а) «Панцир1»; б) «ТОР»;

Система «Тор» призначена для прикриття важливих адміністративних, економічних та військових об'єктів, перших ешелонів сухопутних з'єднань від ударів протирадіолокаційних та крилатих ракет, дистанційно пілотованих літальних апаратів, що планують авіабомб, літаків та гелікоптерів, у тому числі й виконаних за технологією «стелс» [9]. Може працювати як у ручному, за участю операторів, так і в автоматичному режимі. При цьому система "Тор" сама контролює зазначений повітряний простір і самостійно захоплює всі повітряні цілі, не впізнані системою "свій-чужий".

«Панцир-С1» є зенітним ракетно-гарматним комплексом малого радіусу дії, що розміщується на гусеничному шасі, колісному шасі вантажівки, причепа або встановлюється стаціонарно. Управління ведеться двома чи трьома операторами. Протиповітряна оборона здійснюється автоматичними гарматами та керованими ракетами з радіо командним наведенням з інфрачервоним та радіолокаційним стеженням. Комплекс призначений для захисту малорозмірних об'єктів від засобів повітряного нападу (як пілотованих, так і безпілотних). Крім того, комплекс здатний вести боротьбу з легко броньованими наземними цілями, а також живою силою супротивника.

Опираючись на вищесказане можливо зробити висновки що данні РЛС спроможні виявити та протидіяти повітряним порушникам повітряного простору. Також є сенс нагадати про надійність технології та живучість самої станції яку перевірили час та бойові дії. Але через те що БЛПА отримали велике розповсюдження тільки нещодавно ці станції зіштовхнулися з деякими перепонами [5]. По перше до слабкості цієї станції є фактично відкритий доступ методів виявлення через що фактично кожен може вільно розробляти методи протидії та перешкод виявленню, по друге застарілість технології створює додатні перешкоди в умовах міських будівель або об'єктів з високою металізованістю покриття, по третє при польотах вище або нижче «проміню» станції СБЛА є велика вірогідність сплутати корисний сигнал з пасивною перешкодою або з метеоутвореннями.

В даний час переважна більшість систем спостереження та протидії БЛПА зарубіжних країн, складають системи сантиметрового і дециметрового діапазонів. Представницькими зразками таких систем є РЛС: AN / FPS-117, AR 327, TDS 2215/TRS 2230, AN/MPQ-64, MR, GM 400(рис.1.13).



Рисунок 1.13 – Зарубіжні радіолокаційні станції: а) РЛС AN/MPQ-64 Sentinel;
б) Антенна підсистема РЛС M3R

До відповідних переваг порівняно з вітчизняними РЛС можливо віднести повний перехід на цифрову обробку вхідної інформації, більшу дальність виявлення повітряних цілей та автоматичне підстроювання під ціль параметрів пошуку та ідентифікування [6]. Як результат прискорення отримання оперативних даних огляду повітряного простору і можливість передачі її до систем реагування та протидії.

До недоліків можливо віднести велику ціну за станцію (ціна за кожну модель перевищує декілька мільйонів доларів США), вузьку направленість станції (станція чергового режиму повітряного простору не зможе відкоригуватися на пошук цілей на більшій висоті або на відстані). Також важливий недолік є слабкий захист від перехоплювання цифрового сигналу або недостатня протидія системам радіоелектронної боротьби (РЕБ), що у

купі формує суттєвий недолік при спланованому вторгненні у повітряний простір.

До зарубіжних аналогів загального призначення виділяються система AUDDS вартістю 69 мільйонів доларів США (рис.1.14.а) (спільний продукт компаній Blighter Surveillance Systems – виробник наземних радіолокаційних станцій, Chess Dynamics – виробник оптронних систем спостереження і Enterprise Control Systems – фахівець технологій глушіння) та DRONE GUARD вартістю 60 мільйонів доларів США (рис.1.14.б) (виробництво ізраїльської компанії IAI) для виявлення, стеження і виведення з ладу (глушіння) безпілотників у відповідь на зростаючі глобальні заклопотаності в сфері безпеки, пов'язані з все більшим поширенням недорогих і простих в експлуатації дистанційно керованих літальних апаратів. У системах реалізована можливість перемикання форми сигналу з імпульсного, (черговий режим) де радіохвиля зондує повітряний простір раз 2 секунди, на постійний сигнал (режим "вторгнення") де стає можливим спостерігати за "порушником повітряного простору" в реальному часі з мінімальними затримками в часі. Антени підбирають у залежності від місця призначення та місцевості у цілому, при рівній місцевості використовуються статичні градчасті системи для формування секторів виявлення, а у містах або нерівних місцевостях використовуються параболічні чи монохромні омні-антени.



а

б

Рисунок 1.14 – Системи протидії БЛПА: а) Система AUDES; б) Система DRONE GUARD

До переваг систем боротьби можливо віднести невелику ціну, простоту розгортки та великий діапазон пошуку (180 у напрямку антени). Також можна виділити автоматизованість радіолокаційних радарів, що дозволяє перевести роботи системи на повністю автоматичний рівень за заданим алгоритмом.

До недоліків систем потрібно виділити дуже маленьку дальність порівняно з наземними РЛС (до 30км) і залежність від безперебійного зв'язку електронної мережі та сеті інтернет. Також відмічається що через велику широту спостереження з'являється вразливість до пасивних перешкод і метеореологічних явищ (дощ, туман, сніг).

1.6 Постановка завдання

Ціль роботи – синтез структури системи та підвищення ефективності виявлення та протидії середнім БЛПА шляхом виявлення, спостереження та індикацію їх у реальному часі. Дослідження ефективності виявлення СБЛА класичними методами систем РТВ (радіолокаційних військ) на базі РЛС (радіолокаційної станції) та розробка структури системи для ефективного виявлення безпілотних літальних апаратів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технічне завдання та існуючі сучасні рішення;
- проаналізувати сучасні СБЛА та їх основні характеристики і міри протидії виявленню;
- дослідити сучасні методи виявлення літальних апаратів та їх ефективність;
- розробити структуру радіолокаційної станції виявлення СБЛА, здійснити вибір основних технічних параметрів системи;

– оформити пояснювальну записку керуючись методичними вказівками до підготовки випускної кваліфікаційної роботи магістра та згідно ДСТУ 3008-2015.

Задачею є дослідження існуючих методів виявлення СБЛА та їх використання у системі радіолокаційного виявлення для комплексного застосування і підвищення ефективності.

Основні вимоги до цілей виявлення такі:

- дальність виявлення- більше 25 км;
- ЕПР об'єкту- 0,1 кв. м;
- діапазон хвиль- сантиметровий;
- принцип дії- імпульсна РЛС.

2 ПОБУДОВА СТРУКТУРИ РЛС ВИЯВЛЕННЯ СБЛА

2.1 Розробка структурної схеми системи виявлення СБЛА

Основні функції розроблювальної системи:

- моніторинг повітряного простору на наявність СБЛА;
- можливість роботи у ручному та автоматичному режимі;
- відображення вхідної інформації на зовнішньому екрані або екрані смартфона чи комп'ютеру;
- індикація стану станції.

Структурна схема частини модулю наведена на рисунку 2.1.

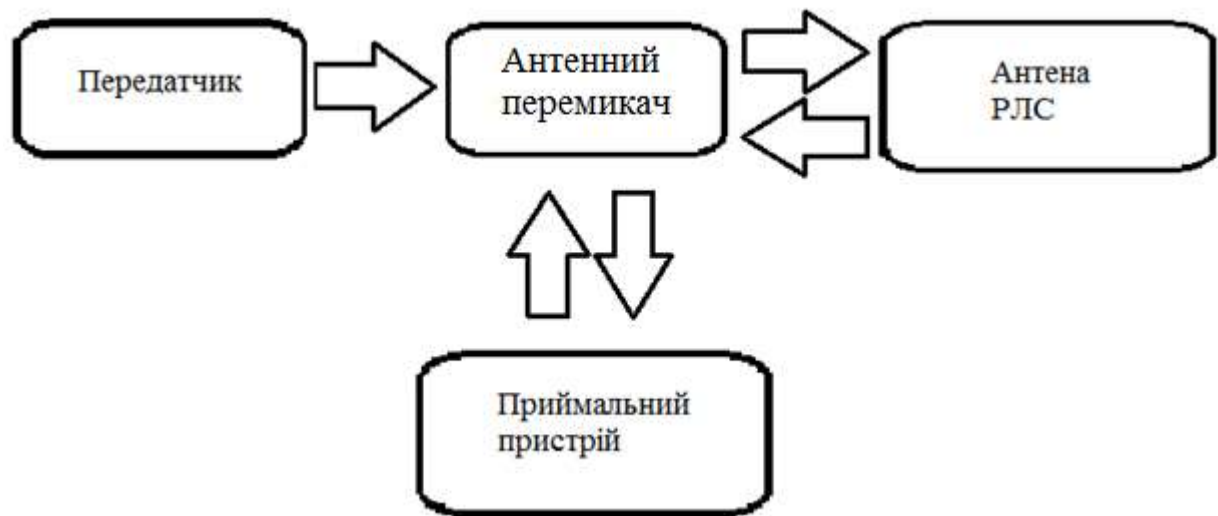


Рисунок 2.1 – Структурна схема радіолокаційної станції для виявлення СБЛА

Спираючись на наведений рисунок схеми можна виділити основні блоки системи:

- передатчик;
- антенний перемикач;
- антена РЛС;
- приймальний пристрій.

Передатчик є джерелом електромагнітного сигналу. Він може бути потужним імпульсним генератором. Для імпульсних РЛС сантиметрового діапазону - зазвичай магнетрон або імпульсний генератор, що працює за схемою: генератор, що задає, - потужний підсилювач, що використовує як генератор найчастіше лампу хвилі, що біжить (ЛБХ).

У тих радіолокаторах, де для випромінювання зондуючих сигналів і для прийому луна-сигналів від цілей використовується одна і та ж антена, обов'язковим елементом конструкції є електронний комутатор. Такі перемикаючі пристрої називаються антенними перемикачами. Перемикання антени між режимами випромінювання і прийому супроводжується однією проблемою — необхідно забезпечити максимальне використання доступної енергії сигналів. Найпростішим рішенням є використання комутатора для підключення антени до передавача на час випромінювання зондуючого сигналу і потім перемикання її на приймач на час, протягом якого очікується прийом відлуння-сигналів цілей.

Антена РЛС виконує випромінювання сигналу передавача в заданому напрямку та прийом відбитого від мети сигналу [10]. Залежно від реалізації прийом відбитого сигналу може здійснюватися або тією ж антеною, або інший, яка іноді може розташовуватися на значній відстані від передавальної. У випадку, якщо передача та прийом поєднані в одній антені, ці дві дії виконуються по черзі, а щоб потужний сигнал передавача не просочувався в приймач, перед приймачем розміщують спеціальний пристрій, що закриває вхід приймача в момент випромінювання сигналу зонду.

Приймальний пристрій виконує посилення та обробку прийнятого сигналу. У найпростішому випадку результуючий сигнал подається на променеву трубку (екран), яка показує зображення, синхронізоване з рухом антени.

2.2 Вибір довжини хвиль

Важливим фактором при виборі діапазону довжин хвиль є характер відображення радіохвиль від цілей, якщо розміри мети менші за довжину хвилі, то інтенсивність відображення мала. При цьому ціль можна уподібнити антені з дуже малою діючою висотою або малою ефективною площею. При виборі довжини хвиль опираємося на загальний стандарт РЛС (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Діапазони РЛС

Діапазон	Етимологія	Частоти	Довжина хвилі	Пояснення
HF	high frequency	3-30 МГц	10-100 м	Радари берегової охорони, «загоризонтні» РЛС
P	previous	< 300 МГц	> 1 м	Використовувався у перших радарах
VHF	very high frequency	50-330 МГц	0,9-6 м	Виявлення на великих дальностях, дослідження землі
UHF	ultra high frequency	300-1000 MHz	0,3-1 м	Виявлення на великих дальностях (наприклад, артилерійського обстрілу), дослідження поверхні землі, лісів
L	Long	1-2 ГГц	15-30 см	спостереження та контроль за повітряним рухом
S	Short	2-4 ГГц	7,5-15 см	керування повітряним рухом, метеорологія, морські радари
C	Compromise	4-8 ГГц	3,75-7,5 см	метеорологія, супутникове мовлення, проміжний діапазон між X та S
X		8-12 ГГц	2,5-3,75 см	картографування середнього дозволи; у США

				діапазон 10,525 ГГц ± 25 МГц використовується в РЛС аеропортів.
K _u	under K	12-18 ГГц	1,67-2,5 см	картографирование высокого разрешения, спутниковая альтиметрия
K	нем. kurz - «короткий»	18-27 ГГц	1,11-1,67 см	Діапазон K використовується для виявлення хмар, у поліцейських дорожніх радарах (24,150±0,100 ГГц).
K _a	above K	27-40 ГГц	0,75-1,11 см	Картографування, керування повітряним рухом на коротких дистанціях, керуючі дорожніми фотокамерами (34,300±0,100 ГГц)
mm		40-300 ГГц	1-7,5 мм	миллиметровые волны, делятся на два следующих диапазона
V		40-75 ГГц	4,0-7,5 мм	медичні апарати КВЧ, застосовувані для фізіотерапії, а також апарати для діагностики (наприклад, методом Фолля)

Якщо узагальнити вище вказану інформацію то усі діапазони довжини хвиль можна поділити на метровий(HF, P, VHF), дециметровий(UHF, L, S), сантиметровий(C, X, K_u, K, K_a) та міліметровий(mm, V) діапазон.

Метрові хвилі (1-100м) поширюються в межах прямої видимості на відстані до декількох десятків кілометрів. Характеристики поширення метрових хвиль істотно залежать від рельєфу місцевості і типу підстильної

поверхні. Вплив атмосфери Землі виражається в розсіянні метрових хвиль слабкими неоднорідностями іоносфери і тропосфери, відображенні метрових хвиль від іонізованих слідів метеорів і штучно іонізованих областей в атмосфері, що призводить до далекого поширення метрових хвиль. Використовуються у радіозв'язку, радіолокації на великих відстанях (для виявлення великих цілей), у телебаченні та радіо.

Дециметрові хвилі (10см-1м) при розповсюдженні вздовж земної поверхні дециметрові хвилі поширюються лише в межах прямої видимості та передачі, за нормальних умов, більш ніж на 100 кілометрів утруднена. Дальність прийому сигналу то, можливо збільшена рахунок можливості дециметрових хвиль розсіюватися на неоднорідностях тропосфери. Використовується у радіорелейному зв'язку, радіолокації (на відстань зони видимості), у телебаченні, сотовому зв'язку та мережі Wi-Fi.

Сантиметрові хвилі (1-10см) цього діапазону знаходять різноманітне застосування у сучасній техніці. Наприклад, стандартом частоти для мікрохвильових печей та промислових плазмових НВЧ установок є близька до діапазону сантиметрових хвиль частота 2,45 ГГц. Це частота резонансного поглинання для молекул води, а оскільки у всі продукти харчування входить вода, то у НВЧ-печі з цією частотою можна ефективно нагрівати будь-який продукт. Крім того, для випромінювання на цій частоті атмосфера непрозора через його поглинання парами води. Частоти порядку 5,8 ГГц використовуються в радіокерованому авіамоделізм для пілотування за зображенням відеокамери.

Відмінною рисою міліметрового діапазону (1-10мм) є малі розміри антен і велика абсолютна смуга частот (що забезпечує можливість спільного використання діапазону великим числом радіосистем). Однак, в порівнянні з більш низькочастотними діапазонами, радіохвилі міліметрового діапазону відчують сильне загасання при поширенні в земній атмосфері. Внаслідок цього земні радіосистем міліметрового діапазону характеризуються малою дальністю дії (від десятків кілометрів до декількох сотень метрів) і сильною

залежністю від погодних умов. Їх використання доволі поширене майже у багатьох сферах таких як наукові дослідження (зондування землі, моніторинг атмосфери, термоядерний синтез), телекомунікації, озброєння (РЛС по виявленню ракет, зенітно-артилерійських комплексів на кораблях), медицина(сканер на міліметрових хвилях, КВЧ-терапія).

При виборі довжини хвилі ми опираємося на такі параметри як дальність випромінювання, можливість перетину природних атмосферних явищ(пар, дощ, туман, хмари) та ефективність виявлення об'єкта. Відображення залежності зображено на рисунку 2.2.

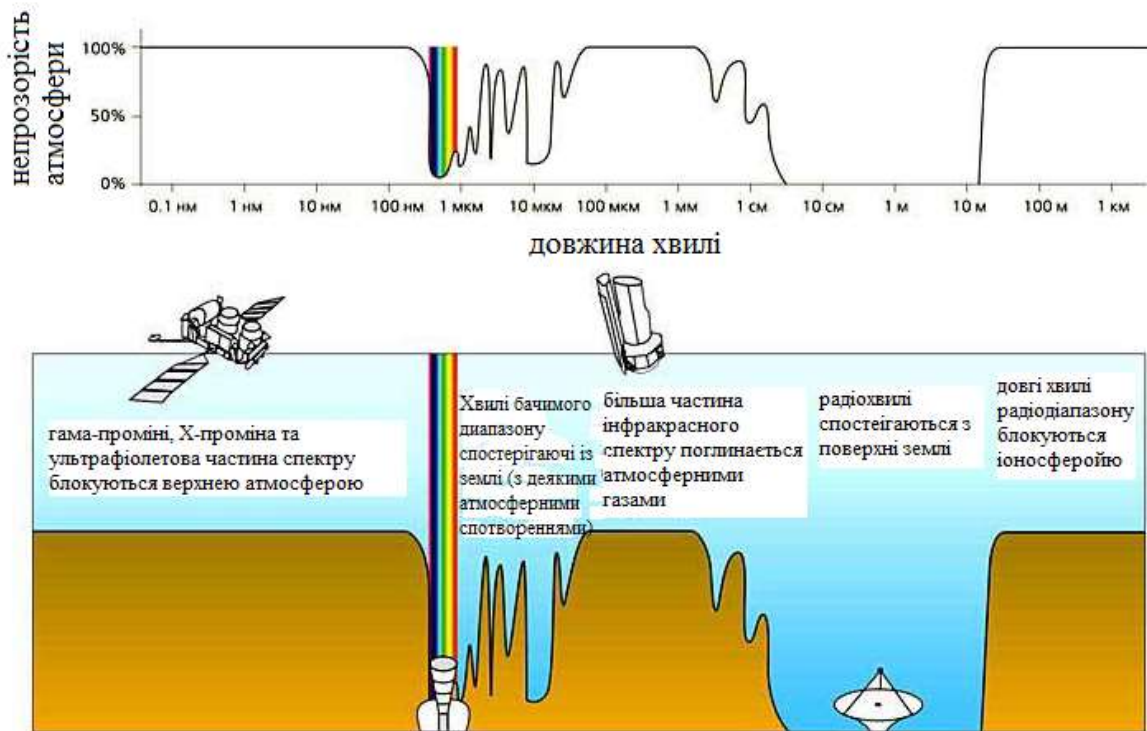


Рисунок 2.2 – Графік залежності довжини хвилі та її непрозорість у атмосфері

З вищевказаного графіку можна зробити висновок що потрібно зробити вибір опираючись на переваги та недоліки довжини хвиль. Згадуючи що ціллю нашої РЛС є СБЛА потрібно вважати що ЄПР об'єкту буде до 3м^2 , а відстань до 50км ми можемо виключити міліметрові (через велику кількість пасивних перешкод з котрими будуть зіштовхуватися на шляху до цілі та

маленька дальність виявлення) та метрові хвилі (через малі розміри цілі на фоні діаграми направленості вона буде нерозрізною).

У нашому випадку підходять довжини хвиль L (1,5 – 3 дцм), S (0,7 – 1,5 дцм), C (3,75 см – 7,5 см) та X (2,5 – 3,75 см). Дециметровий діапазон використовують для контролю повітряного простору, але нам потрібно пам'ятати що СБЛА менші за звичні нам літаки, тому нам більше підійде сантиметровий діапазон котрий використовується для спостереження у РЛС аеропортів навіть за птахами.

При виборі довжини хвилі несущого коливання слід враховувати що зменшення довжини хвилі λ дозволяє при менших габаритах антени одержати необхідну ширину діаграми спрямованості за половинною потужністю θ . Проте, чим менше λ , тим більше втрати електромагнітної енергії при поширенні хвиль в атмосфері, зокрема, втрати у молекулах кисню, водяній парі, краплях дощу та туману .

Ефективна площа вторинного випромінення S_u реальних об'єктів залежить від довжини хвилі. Якщо λ більше, ніж геометричні розміри цілі, то S_u виявляється дуже малою. Наприклад, для сферичного об'єкта з діелектричною проникністю ϵ , діаметр якого $d \ll \lambda$, відома формула Релея:

$$S_u = \pi d^2 \frac{(\epsilon - 1)^2}{4(\epsilon + 1)^2} \quad (2.1)$$

Підставивши у рівняння відомі параметри отримаємо довжину хвилі необхідну для виявлення цілі:

$$0,3\text{м}^2 = 3,14^5 \frac{0,28\text{м}^2}{\lambda^4} \left(\frac{0,01\text{м}^2 - 1}{0,01\text{м}^2 + 1} \right)^2 \Rightarrow \lambda = 0,06569\text{м} \approx 6,6\text{см} \quad (2.2)$$

У результаті бачимо, що для виявлення цілі з ефективною поверхнею розсіювання $0,3\text{м}^2$ потрібна довжина хвилі $6,6\text{см}$ що підходить для використання за заданими параметрами.

2.3 Вибір виду огляду простору

Для виявлення СБЛА і визначення їхніх координат необхідно зробити радіолокаційний огляд доступного для РЛС простору за дальністю, кутовими координатами, а також за швидкістю наявних у ньому об'єктів. Процес огляду полягає в тім, що в кожен роздільний об'єм зони огляду необхідно періодично надсилати зондувальний сигнал. Мінімальний необхідний час огляду при заданій максимальній дальності дуже малий навіть для найвіддаленіших наземних цілей, він дорівнює:

$$t_{\text{э max}} = \frac{2R_{\text{max}}}{c}. \quad (2.3)$$

Для практичної реалізації потенційних можливостей РЛС, що зазвичай розраховані на оброблення пачки з N імпульсів, як мінімальний час огляду за дальністю слід прийняти (за однакової амплітуди імпульсів) величину

$$T_{\text{опр}} = t_{\text{э max}} + (N - 1)T_n \approx NT_n = \frac{N2R_{\text{max}}}{c}. \quad (2.4)$$

Цей час порівняно малий. Надалі мова йтиме лише про огляд за кутовими координатами.

Вибір методу огляду простору напряму залежить від вибору нашої антени (рис.2.3), яка у свою чергу має переваги та недоліки у використанні певних сигналів.



Рисунок 2.3 – Структурна схема вибору огляду простору

До безперервних антен (рис.2.4) відносяться антени котрі мають цільну структуру у якої електромагнітне поле в розкритті утворюється за рахунок відображення електромагнітної хвилі від металевої поверхні спеціального дзеркала (рефлектора). Як джерело хвилі зазвичай виступає невеликий випромінювач, що розташовується у фокусі дзеркала. У його ролі може бути будь-яка інша антена з фазовим центром, що випромінює сферичну хвилю. Основна Ціль безперервних антен зводиться до перетворення сферичного або циліндричного фронту хвилі у плаский фронт.



Рисунок 2.4 – Безперервні антени

Зазвичай в дзеркальних антенах відбувається перетворення більш широкої діаграми спрямованості випромінювача в вузьку діаграму спрямованості самої антени.

Кромка дзеркала і площина Z утворюють поверхню, звану розкритом дзеркала. При цьому радіус R називається радіусом розкриття, а кут 2ψ — кутом розкриття дзеркала. Від кута розкриття залежить тип дзеркала:

- якщо $\psi < \pi / 2$ -Дзеркало називають дрібним або довгофокусним;
- якщо $\psi > \pi / 2$ -глибоким або короткофокусним;
- якщо $\psi = \pi / 2$ -середнім.

Фокус випромінювача антени може як розташовуватися у фокусі дзеркала F , так і бути зміщеним щодо нього. Якщо фокус випромінювача розташований у фокусі антени, то вона називається прямофокусною. Прямофокусні антени існують різних розмірів, в той час як осесиметричні антени, випромінювач яких знаходиться не в фокусі дзеркала, зазвичай не перевищують в діаметрі більше 1,5 м. Антени за таким принципом дії часто називають офсетними. Перевага офсетної антени - це більший коефіцієнт посилення антени, що обумовлено відсутністю затінення розкриття дзеркала випромінювачем. Рефлектор офсетних антен являє собою бічну вирізку з параболоїда обертання. Фокус випромінювачів в таких антенах розташований у фокальній площині рефлектора.

Безперервна антена може мати одночасно кілька випромінювачів, розташованих у фокальній площині антени. Кожен випромінювач формує діаграму спрямованості, спрямовану в потрібному напрямку. Випромінювачі можуть працювати в різних діапазонах хвиль (C , K_u , K_a) або кожен одночасно в декількох діапазонах.

Залежно від поставлених завдань і випромінювача безперервна антена формує одну вузько направлену сумарну, сумарно-різницеву діаграму спрямованості (для пеленгаторів) або одночасно кілька різноспрямованих діаграм — при використанні декількох випромінювачів.

Перевагою безперервних антен є більше КПД як у енергоефективності так і у дальності сигналу. До недоліків можливо віднести велику собі цінність виробництво та монтажу антени, складність реалізації обертальних секторів через складну динаміку, та потрібно зазначити малу живучість (при будь якому пошкодженні поверхні випромінювача точність випромінювання значно зменшується). З цього можна зробити висновок що дана антена найбільше підходить для моніторингу на великі відстані у статичному положенні із використанням одного промінню з великою потужністю.

При виборі антени також потрібно приділити увагу альтернативі, а саме фазованій антенній решітці (ФАР) (рис.2.5). Фазована антенна решітка складається з деякої кількості випромінюючих елементів, кожен з яких має свій фазообертач. Промінь формується шляхом зсуву фази сигналу, випромінюваного кожним випромінюючим елементом, так, щоб виникала їх інтерференція у фазі/протифазі для повороту променя в бажаному напрямку.

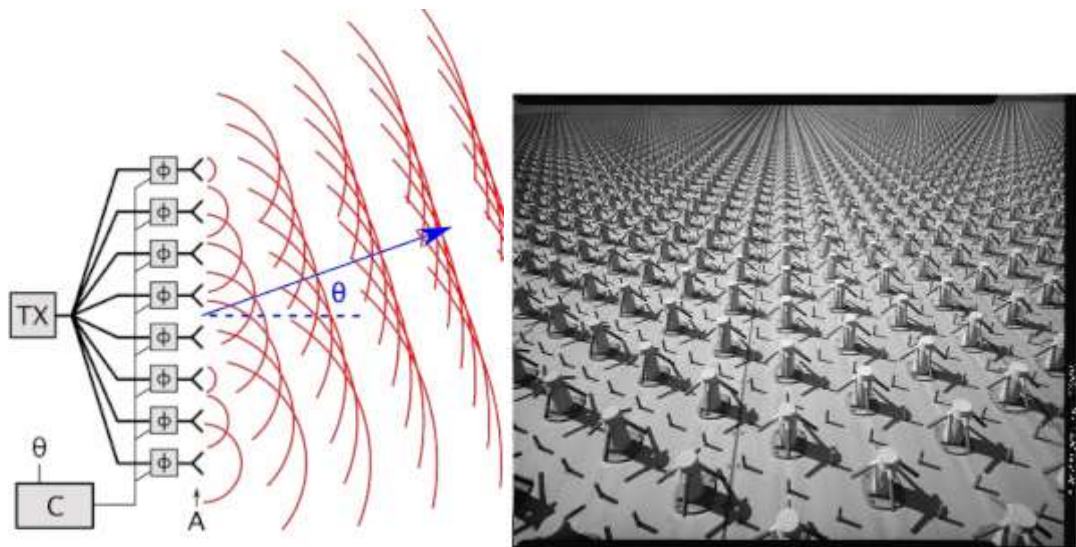


Рисунок 2.5 – Фазована антенна решітка

Випромінюючий елемент фазової антенної решітки — складова частина антени решітки, антена або група антен із заданим відносним збудженням. В антенній решітці необхідна діаграма спрямованості формується завдяки спеціально організованій інтерференції електромагнітних хвиль, що

випромінюються в простір її випромінюючими елементами. Для цього забезпечують необхідний амплітудно-фазовий розподіл - необхідні відносні амплітуди та початкові фази змінних струмів або полів збудження кожного випромінюючого елемента антени.

До переваг ФАР можливо віднести:

- Антенна решітка з N випромінюючих елементів дозволяє збільшити приблизно в N раз коефіцієнт спрямованої дії (КНД) і, отже, коефіцієнт посилення антени в порівнянні з одиночним випромінювачем, а також звужити промінь для підвищення перешкоди, що дозволяє здібності по кутових координатах, точності пеленгації джерел радіо радіолокації та радіонавігації;

- В антенній решітці можливе збільшення електричної міцності в порівнянні з апертурною антеною, оснащеною одиночним випромінювачем;

- Важливою перевагою ФАР є можливість швидкого огляду (сканування) простору рахунок «качання» променя діаграми спрямованості електричними методами (проти антенами з механічним скануванням променя). Така ФАР є антеною з електричним скануванням променя;

- Функціональні можливості ФАР розширюються при використанні спільно з кожним випромінюючим елементом активного модуля. Такі ФАР називають активними.

При виборі кількості промінів потрібно враховувати призначення та відстань виявлення умовної цілі. При використанні декількох промінів дальність гарантованого виявлення зменшується, але збільшується площа та кут діаграми направленості (пропорційно відношенню кількості промінів та куту нахилу антени) (рис.2.6.а). Проте потрібно пам'ятати що при збільшенні промінів також ускладнюються обробка прийнятого відображеного сигналу через перешкоди від сусідніх сигналів, також потрібно враховувати що при збільшенні кількості сигналів на N -разів з'являється необхідність у збільшенні потужності у N -разів що здорожує монтаж та використання РЛС. При використанні одного промінню ситуація зворотна. Площа виявлення

зменшується до одного промінню і у результаті на кут діаграми направленості обмежений одним напрямком(рис.2.6.б). Проте використання одного проміння помітно економніше порівняно з декількома проміннями бо зменшується енерговитрати та необхідність у великій кількості обладнання для обробки багатьох сигналів. Також потрібно зазначити що дальність виявлення при використанні одного проміння збільшується приблизно на 20%, що доволі суттєво урахуовуючи що радіолокаційний метод найбільш дальномірний.

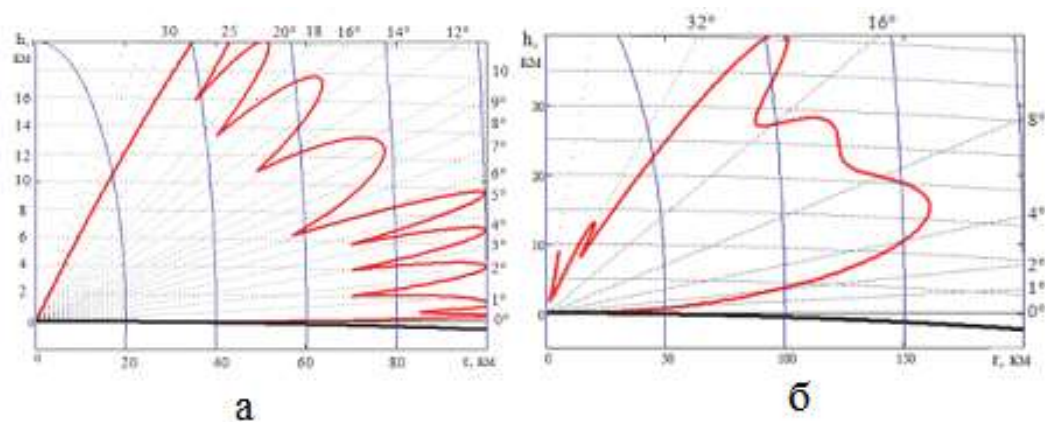


Рисунок 2.6 –Зони виявлення радіолокаційного методу:

- а) При використанні декількох промінів; б) При використанні одного промінню

Так як розроблювальна система виявлення СБЛА буде використовуватися у комплексі з іншими засобами виявлення, ми зробимо акцент на дальності вимірювання радіолокаційного методу. Тому наш вибір це безперервна антена з використанням одного промінню для отримання максимальної дальності виявлення у черговому та активному режимі.

Для пошуку розмірів антени ми скористаємося формулою:

$$\theta_{аз} \approx \frac{60\lambda}{l_{гор}} \quad (2.5)$$

Вважаємо що $\theta_{аз} \approx \delta\varphi_{азот} = 1,2^\circ$. Підставивши відомі значення розрахуємо:

$$l_{гор} \approx \frac{60\lambda}{\theta_{аз}^{\circ}} = \frac{60 \cdot 0,066}{1,2} = 3,3 \text{ м.} \quad (2.6)$$

Встановимо вертикальний розмір $l_{верт}=0,5l_{гор}=1,15 \text{ м.}$

У результаті отримали безперервну антену за розмірами 1,15м на 3,3 м.

2.4 Вибір виду сигналу

Дальність вимірюється за допомогою закону про час поширення сигналу між переданим і прийнятим сигналом. Тому вибір виду сигналу складає важливу частину формування РЛС. Існує багато видів сигналів, однак ми зупинимо свою увагу на двох типах найбільш поширених у радіолокаційному методі (рис.2.7), а саме на імпульсному та безперервному.

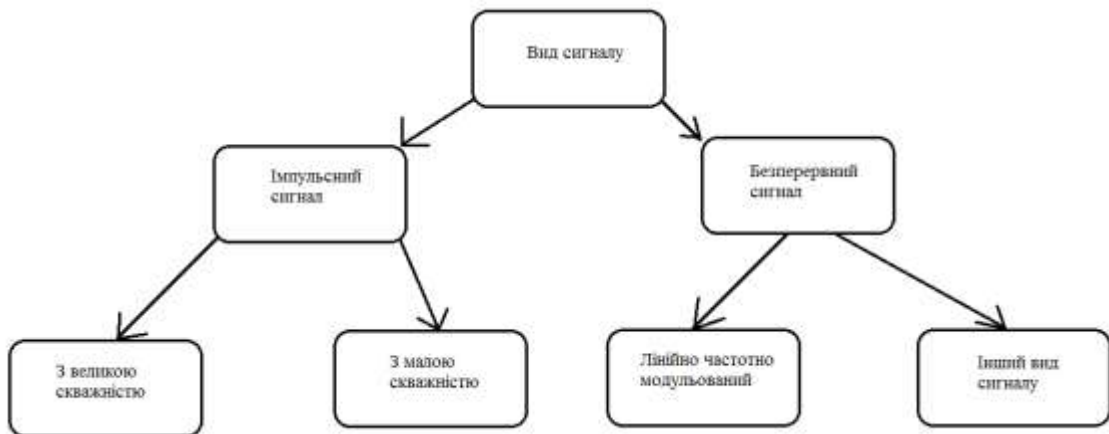


Рисунок 2.7 – Види сигналу

Імпульсний сигнал це форма сигналу для виміру дальності - одиночний імпульс, який передається РЛС, відбивається від об'єкта і приймається РЛС назад. Вимірюючи час поширення переданого сигналу τ , дальність R можна визначити як рівняння 2.7, де c - швидкість світла.

$$R = \frac{c}{2} \tau \quad (2.7)$$

Рисунок 2.8 показує загальний принцип роботи імпульсної РЛС, що використовує тривалість імпульсу T_p та період повторення імпульсів T_r .

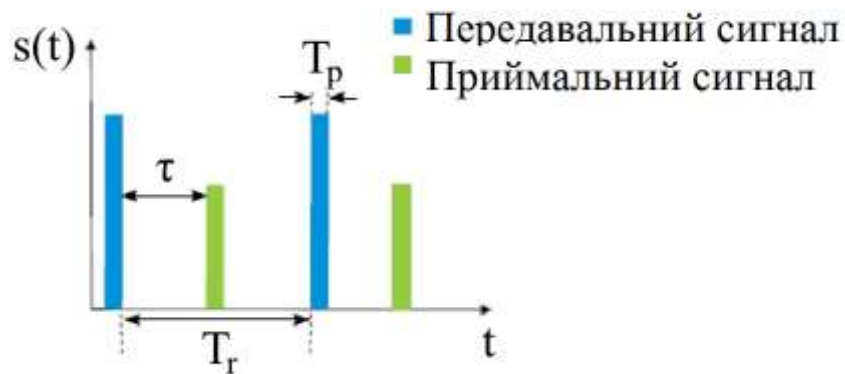


Рисунок 2.8 – Принцип роботи імпульсного сигналу

В імпульсних РЛС оглядового типу тривалість пачки $\tau_{пачки}$ та число імпульсів у пачці N_c залежать від T_i , швидкості обертання антени n та ширини діаграми спрямованості $\theta_{аз}$. Тут тривалість сигналу $\tau_c = \tau_{пачки}$,

$$\tau_c = \frac{\theta_{аз}}{360} T_{огл.аз} \quad (2.8)$$

де $T_{огл.аз}$ – час одноразового огляду за азимутом; n – число обертів антени за хвилину.

Число імпульсів у пачці з урахуванням (2.4)

$$N_c = \frac{T_{огл.аз}}{T_r} \quad (2.9)$$

де $T_{опр}$ – час опромінення зосередженої цілі.

Період випромінювання імпульсів T_i вибирають з умови однозначного визначення дальності:

$$T_i = \kappa 2Dc, \quad 1 \leq \kappa \leq 15. \quad (2.10)$$

У формулі (2.10) D відповідає граничному значенню шкали дальності, яке може суттєво перебільшувати дальність радіовиявлення цілі з заданою ЕПЦ.

Наприклад, нехай дальність радіовиявлення цілі з ефективною площею вторинного випромінювання $S_{ц1}=0,09\text{м}^2$ дорівнює 150 км. Якщо задано $S_{ц2}=0,09\text{м}^2$, це не означає, що не може з'явитися ціль з більшою ЕПЦ, зокрема, з $S_{ц1}=0,5\text{м}^2$. Тоді дальність радіовиявлення збільшиться у $(S_{ц2}/S_{ц1})^{1/4}$ разів, тобто буде у $\sqrt[4]{5,5} = 1,647$ рази більшою, а саме – 247 км. Якщо $S_{ц1} = 1,44\text{м}^2$, то $D=30\text{км}$. Очевидно, щоб виключити можливість появи хибної позначки від цілі з великою $S_{ц}$, треба вірно визначити T_i не тільки згідно з (2.10), але й з урахуванням імовірності перевищення заданої ЕПЦ.

Також при виборі імпульсного сигналу потрібно вибрати з якою шпаруватістю буде випромінюватися сигнал. Шпаруватість (у фізиці, електроніці) – безрозмірна величина, одна з характеристик імпульсних систем, що визначає відношення періоду проходження (повторення) імпульсів до тривалості імпульсу. Таким чином, для імпульсного сигналу справедливі наступні співвідношення:

$$S = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{D}, \quad D = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{S}, \quad (2.11)$$

де S – шпаруватість, T – період імпульсів, τ – тривалість імпульсу, D – коефіцієнт заповнення. Відповідно шпаруватість впливає на період повторення імпульсів що у свою чергу впливає на вірогідність виявлення цілі та можливість розрахування її швидкості та траєкторії польоту. У нашому

випадку оптимально використовувати імпульсний сигнал з великою шпаруватістю для виявлення повітряної цілі з максимальною дистанцією. Проте потрібно розглянути варіант переключення на меншу шпаруватість у випадку виявлення цілі для більшої детальності її польотних характеристик.

При розрахунку періоду імпульсів ми користуємося умовами завдання, а саме вважаємо що дистанція до цілі $D=25\text{км}$. Тоді скориставшись формулою розрахунку періоду повторювання імпульсів отримаємо:

$$T_i = 1,2 \frac{2D}{c} = 1,2 \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{с} \quad (2.12)$$

Виходячи з цього розрахуємо тривалість простого імпульсу дорівнює:

$$\tau_i = \frac{2\delta D_{nom}}{c} = \frac{2 \cdot 30}{3 \cdot 10^8} = 0,2 \cdot 10^{-6}. \quad (2.13)$$

Тривалість радіолокаційного сигналу, тобто відбитого сигналу, що обробляється до одержання некорельованого відліку координат дорівнює 0,2 с. Число імпульсів, що обробляються за цей час:

$$N_c = \frac{\tau_{пачки}}{T_i} = \frac{0,2}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 166. \quad (2.14)$$

Потенційні середньоквадратичні помилки:

$$\delta(D)_{nom} \approx 0,15 \delta(D) = 0,15 \cdot 20 = 3\text{м}; \quad (2.15)$$

$$\delta(\varphi)_{nom} \approx 0,15 \delta(\varphi) = 0,15 \cdot 0,4 = 0,06^\circ. \quad (2.16)$$

Відношення сигнал-шум q оптимального вимірювального пристрою обчислюється за допомогою формул:

$$\delta(D)_{nom} = \frac{c}{2q\Delta f}, \quad \delta(\varphi)_{nom} = \frac{\theta}{q}. \quad (2.17)$$

Для простого сигналу ($\tau_i\Delta f=1$)

$$q_1 = \frac{c}{2\delta(D)_{nom}\Delta f} = \frac{c\tau_i}{2\delta(D)_{nom}} = \frac{3\cdot 10^8 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3} = 10; \quad (2.18)$$

$$q_2 = \frac{\theta^0}{\delta(\varphi^0)_{nom}} = \frac{1,6^0}{0,06^0} = 26,66 \approx 27. \quad (2.19)$$

Тут треба зазначити, що, на відміну від РЛС виявлення, скорочення тривалості імпульсу τ_i зменшує необхідне значення параметра q_1 . Тому можна обрати таке значення τ_i , щоб $q_1 \approx q_2$.

Надалі будемо вважати $\tau_i=0,6 \cdot 10^{-6}$ с. Тоді $q_1=30$, і це значення визначатиме необхідне відношення сигнал-шум. Далі нам потрібно встановити коефіцієнт розрізнявальності для подальшого знаходження енерговитрат:

$$k_p = \frac{E_1}{N_0} = \frac{q^2}{2N_c} \prod_{i=1}^n \alpha_i. \quad (2.20)$$

Коефіцієнти втрат внаслідок

- неоптимальної фільтрації $\alpha_1 \approx 1,3$;
- втрат в антенно-фідерних пристроях $\alpha_2 \approx 1,6$;
- некогерентного нагромадження $\alpha_3 \approx 1,8$.

Таким чином,

$$\prod_{i=1}^n \alpha_i = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 = 1,3 \cdot 1,6 \cdot 1,8 = 3,74 \approx 4, \quad (2.21)$$

$$k_p = \frac{30^2 \cdot 4}{2 \cdot 166} = 10,84 \approx 11.$$

Розрахуємо енерговитрати на один імпульс:

$$E_1 = k_p N_0 = k_p k T k_{ш}. \quad (2.22)$$

Вважаємо що $T=293$ К, $k_{ш}=3$. Тоді $E_1=11 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 3=1,33 \cdot 10^{-19}$ Вт·с.

Виходячи з цього порогова потужність складає:

$$P_{пор} = \frac{E_1}{\tau_i} = \frac{1,33 \cdot 10^{-19}}{0,6 \cdot 10^{-6}} = 2,22 \cdot 10^{-13} \text{ Вт}. \quad (2.23)$$

Знаючи порогову потужність виведемо імпульсну потужність зондувального сигналу згідно формули пошуку імпульсного передавача:

$$P_i = \frac{(4\pi)^3 D_0^4 P_{пор}}{G_{рс}^2 \cdot \lambda^2 \cdot S_{ц}} = \frac{(4\pi)^3 \cdot (30 \cdot 10^3)^4 \cdot 2,22 \cdot 10^{-13}}{7930^2 \cdot (0,066)^2 \cdot 0,3} = 4,335 \cdot 10^3 \approx 4,4 \text{ кВт}. \quad (2.24)$$

Таким чином ми визначили що для формування імпульсу РЛС витрачаються 4,4 кВт що є дуже економічно порівняно з класичними звичайні РЛС, але має перевагу у виявленні СБЛА на дистанції до 30 км, на висоті до 12 км і без впливу погодних умов.

3 МЕТОДИ, АЛГОРИТМИ І ПРИСТРОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛУ

3.1 Аналого-цифрове перетворення сигналів системи виявлення БЛПА

У сучасних РЛС багато базових функцій ВЧ-блоку (наприклад, налагодження частоти або перетворення з пониженням частоти) переносяться в цифрову область і можуть бути реалізовані на ПЛІС. З одного боку, це дозволяє значно зменшити розмір кінцевого пристрою і спростити розміщення приймального модуля на різних рівнях РЛС, з іншого — сучасні пристрої з ПЛІС не підтримують тактову частоту (ТЧ) з необхідними властивостями.

Технологія дискретизації ВЧ-сигналів, вже доступна на діапазонах L, S і C, дозволяє обробляти всю робочу смугу РЛС. В даному випадку для розширення можливостей цифрової обробки був розроблений інноваційний алгоритм цифрової обробки широкосмугових сигналів з використанням ПЛІС на РЛС. Такий алгоритм забезпечує цифрову обробку широкосмугових сигналів з (ТЧ) ПЛІС, яка набагато нижче частоти Найквіста. Також алгоритм може застосовуватися для зниження ТЧ ПЛІС і, отже, енергоспоживання, що є актуальною проблемою для модулів малого розміру і ваги. Далі розглядається функціональність, продуктивність і реалізація ПЛІС для даного алгоритму.

Стандартні РЛС військового призначення використовують метод стрибкоподібної перебудови частоти в якості протидії загрозам: в робочому діапазоні частот [11] РЛС генерується вузько смуговий сигнал, після чого за допомогою гетеродина з швидкою перебудовою частоти (англ. Agile Local Oscillator, ALO) здійснюється зсув частоти. Сигнали, що характеризуються широкою миттєвою смугою пропускання, необхідні для побудови зображень, зв'язку та інших призначень. Сучасні системи дискретизації ВЧ-сигналів забезпечують взяття відліків для всього робочого діапазону частот РЛС і на

рівні певної частини антенної решітки, і на рівні одного антенного елемента. Цей підхід забезпечує при цифровій обробці даних реалізацію такого стандартного аналогового функціоналу, як швидка перебудова частоти. Незважаючи на те, що новітні технології пропонують використання пристроїв з АЦП з високою частотою дискретизації, сучасні пристрої з ПЛІС не підтримують ТЧ, необхідну для управління такими сигналами, стаючи, на перший погляд, реальним обмеженням нового підходу в архітектурі РЛС. Для подолання цього обмеження і реалізації широкосмугового і повністю цифрового приймального модуля представлений новий метод цифрової обробки сигналів, що дозволяє управляти широкосмуговими сигналами на базі стандартних ПЛІС.

Останнє покоління АЦП (наприклад, ADC12DJ3200 Texas Instruments або AD9208 Analog Devices) має ВЧ-діапазон з ТЧ понад 6 GSPS (Giga Samples Per Second — млрд вибірок в секунду) і не менше 12 біт вертикального дозволу; стандартний інтерфейс взаємодії з ПЛІС управляється за стандартним протоколом JESD204B. такі пристрої є технологічним проривом в розробці і реалізації компактних повністю цифрових приймачів. У такій архітектурі стандартний функціонал ВЧ-блоку РЛС, як, наприклад, настройка частоти, фільтрація або перетворення з пониженням частоти, переноситься в цифрову область.

Схема роботи повністю цифрового приймача представлена на рисунку 3.1: прийнятий сигнал посилюється, фільтрується і оцифровується щодо несучої частоти [12]. Аналогові і ВЧ-канали значно спрощені, оскільки супергетеродинна Архітектура усувається, а корекція фази і амплітуди і формування діаграми спрямованості можуть бути реалізовані в цифровому форматі на ПЛІС. Зменшення розміру і ваги, викликане таким рішенням, спростить установку приймального модуля на різних рівнях РЛС: від певної частини антенної решітки до одного антенного елемента.



Рисунок 3.1 – Структурна схема, що описує роботу повністю цифрового приймача широкосмугового сигналу

У цьому контексті одним з головних завдань є реалізація алгоритмів, ефективно виконують в цифровому вигляді те, що зазвичай виконувалося за допомогою аналогової апаратури; здатних управляти величезними обсягами даних (що більше не потрібно в широкосмугових радіолокаційних додатках, але потрібно в повністю цифрових приймачах у зв'язку з відсутністю гетеродина).

Згідно з теоремою Найквіста-Шеннона (теорема Котельникова, теорема відліків) [13], частота дискретизації на АЦП повинна бути, принаймні, в 2 рази більше корисної частоти (рис.3.2). Виділена сірим частина являє собою робочу смугу частот, а виділена синім – миттєва смуга, вужча, ніж робоча смуга в звичайному радіолокаційному додатку.



Рисунок 3.2 – Ідеальний спектр радіолокаційного сигналу до і після взяття відліків.

Для запобігання або зниження не лінійності всередині діапазону АЦП частота дискретизації може досягати значень, що вдвічі перевищують корисну частоту сигналу. Можливий сценарій зображений на рисунку 3.3, де отриманий сигнал має частоту порядку сотень мегагерц і дискретизується з частотою порядку гігагерц. Крім того, висока частота дискретизації знижує спектральну щільність шуму (і підвищує динамічний діапазон) АЦП [14].



Рисунок 3.3 – Реальний спектр дискретизованого сигналу з інтермодуляційними складовими внаслідок нелінійної роботи АЦП

При виконанні алгоритму цифрового перетворення зі зниженням частоти (англ. Digital Down Conversion, DDC) в режимі реального часу на РЛС (Рис.3.4) тактові імпульси ПЛІС повинні бути такими ж, як і на АЦП: оскільки ТЧ у нашому випадку виконується на робочій частоті $\nu_{роб} = 4545,45455$ МГц, стандартна обробка в режимі реального часу стає реальним обмеженням для роботи повністю цифрового приймача широкосмугового сигналу.



Рисунок 3.4 – Стандартна цифрова архітектура перетворення сигналу зі зниженням частоти

На рисунку 3.4 представлена стандартна архітектура для алгоритму перетворення з пониженням частоти. За допомогою двох гетеродинів з цифровим управлінням (синфазні і квадратурні гетеродини, I / Q) вся робоча смуга РЛС зміщується до основної смуги, після чого проводиться перше проріджування (КИХ-фільтр (англ. Finite Impulse Response, FIR – кінцева імпульсна характеристика) + проріджування) для скорочення обчислювальних витрат. На вузько смугових РЛС Цифрова настройка використовується для вибірки миттєвої смуги в робочій, потім виконуються фільтрація і проріджування для усунення сигналів поза смугою, а також зниження потужності шуму.

Виділена сірим область на рисунку 3.4 показує, як повинна працювати ПЛІС в режимі реального часу з ТЧ, як у АЦП, що робить метод неможливим при частоті дискретизації порядку терагерц. Представлений алгоритм заснований на альтернативній архітектурі для зображеної на рисунку 3.4 «сірої області» і дозволяє обробляти сигнал з ТЧ ПЛІС нижче частоти дискретизації АЦП.

Початкова точка алгоритму-створення стандартного перетворення з пониженням частоти, в якому визначені частота дискретизації АЦП (f_c), значення частоти гетеродина з цифровим управлінням, КІХ-фільтрація і частота проріджування основної смуги (f_{dec}). Далі після визначення робочої частоти ПЛІС паралельно здійснюється робота двох гетеродинів з цифровим

управління і фільтрація. На структурній схемі, зображеній на рисунку 3.5, зображений верхній рівень архітектури.

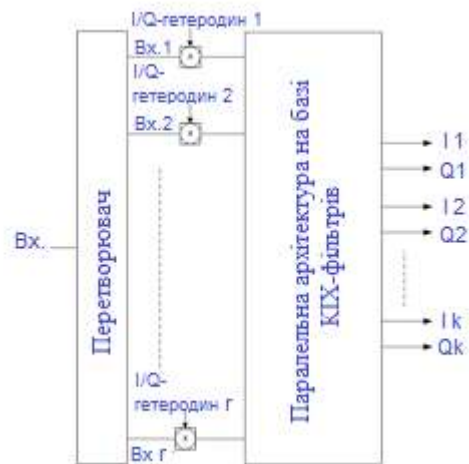


Рисунок 3.5 – Структурна схема інноваційного алгоритму на базі паралельної архітектури з КІХ-фільтрами, де r і k -змінні, що залежать від $f_{\text{ПЛІС}}$ і $f_{\text{дец.}}$

Як приклад для описуваного алгоритму паралельного перетворення з пониженням частоти приймаємо частоту дискретизації АЦП $\nu_{\text{дискрет}} = 5$ ГГц з 12 бітами вертикального дозволу і смугою в $\nu_{\text{несуч}} = 4,5$ ГГц з несучою в С-діапазоні: це параметри чинного широкопasmового повністю цифрового приймача (див.Рис.3.1).

В даному прикладі паралельна архітектура реалізується за допомогою NX ПЛІС $\nu_{\text{ПЛІС}} = 1,25$ ГГц, частота проріджування $\nu_{\text{евус}} = 1,25$ ГГц.

Перетворювач в послідовну / паралельну форму (серіалізація / десеріалізація) на рисунку 3.5 відокремлює відліки від вхідного сигналу, що надходить з АЦП, при 5 GSPS 16 потоками з 312,5 MSPS. Частота цифрових гетеродинів $\nu_{\text{гет}} = 2,2$ ГГц (рис.3.6).



Рисунок 3.6 – Розглянутий випадок: спектр сигналів після дискретизації на АЦП і після широкосмугового перетворення з пониженням частоти.

Важливим питанням, що стосується алгоритму, є розробка КІХ-ФНЧ (англ. Low Pass FIR), який повинен працювати з смугою від $-1,2$ до $4,5$ ГГц і видалення частот по дзеркальному каналу від $-1,6$ до $-1,1$ ГГц. Крім того, розробка таких фільтрів повинна відповідати проріджуванню на виході (1,25 GSPS). На рисунку 3.7 показана АЧХ розробленого фільтра.

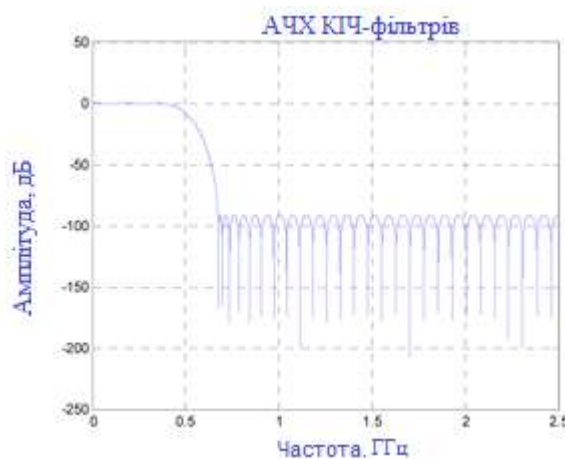


Рисунок 3.7 – АЧХ розробленого КІХ-ФНЧ.

Смуга пропускання становить $2,2$ ГГц, смуга загасання – $4,5$ ГГц, позаполосні збурення – 95 дБн. Порядок дорівнює 64 . Фільтр представляє стандартну архітектуру КІХ-фільтрації (Рис.3.8).

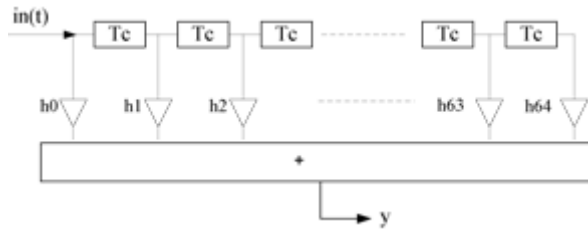


Рисунок 3.8 - Архітектура КІХ-фільтра

Починаючи з первинного КІХ-фільтра, можна розрахувати все до їх паралельної архітектури, представленої на рисунку 3.5.

У наведеному прикладі паралельна архітектура надає 4 виходи, кожен з яких працює на частоті $\nu_{\text{пліс}} = 4,5$ ГГц з можливим чергуванням синфазних і квадратурних компонентів на частоті $\nu_{\text{авус}} = 1,25$ ГГц:

$$I = [I1, I2, I3, I4,]; \quad (3.1)$$

$$Q = [Q1, Q2, Q3, Q4,]. \quad (3.2)$$

Блоки цифрової настройки і кінцевих КІХ-фільтрації і проріджувань, представлені на рисунку 3.4, встановлені для вибору необхідного вузько смугового сигналу і його зміщення на базову частоту.

Для перевірки функціональності запропонованого алгоритму необхідно провести імітаційне моделювання. Стандартна і паралельна Архітектура з однаковим вхідним сигналом були реалізовані за допомогою середовища MatLab, потім був проведений порівняльний аналіз вихідних сигналів. Принцип аналізу наведено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 – Алгоритм моделювання

В якості вхідного сигналу використовується незатухаюча гармонійна хвиля з тепловим шумом. Згідно з дослідженням, частота несучої знаходиться в смузі $[1,2 \div 2,2]$ ГГц після дискретизації АЦП з 5 GSPS. Цифрові гетеродини блокуються при частоті 4,4 ГГц. КІХ і АЧХ, представлені на рисунку 3.10, які використовувалися в стандартному перетворенні, починаючи з КІХ-фільтрів, розраховувалися і для паралельної архітектури. Архітектура імітує роботу ПЛІС на 2,5 ГГц, видаючи синфазний і квадратурний сигнал при 1,25 GSPS.

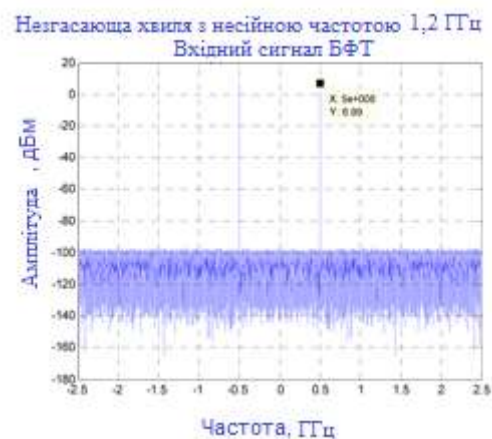


Рисунок 3.10 – Вхідний сигнал незатухаючої хвилею з частотою 1,2 ГГц, продискретизований при 5 GSPS; дозвіл БПФ 10 кГц.

На рисунку 3.11 зображені результати на виході стандартної (рис.3.11.а) і паралельної архітектури (3.11.б), відповідно.

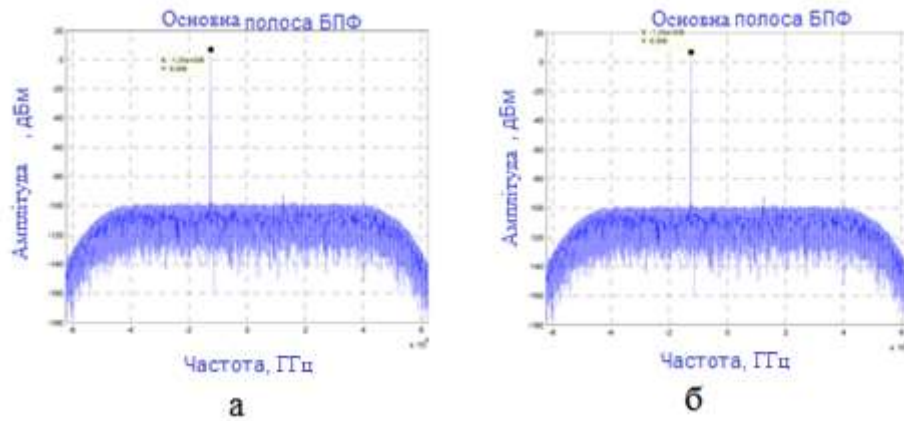


Рисунок 3.11. Вихідний сигнал після перетворення з пониженням частоти: а) стандартного перетворення, б) паралельного перетворення сигнал встановлюється на -1,15 ГГц; дозвіл БПФ 10 кГц.

На рисунку 3.12 показана різниця амплітуд на виході з швидким перетворенням Фур'є (БПФ), тобто дві архітектури (стандартна і паралельна) фактично дають однакові результати.

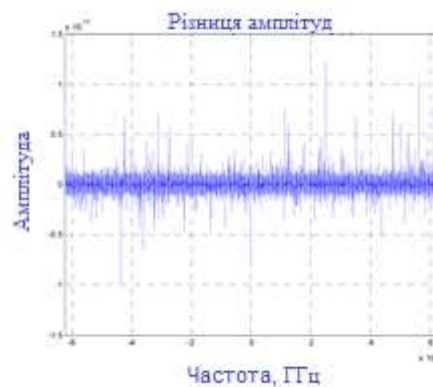


Рисунок 3.12 - Різниця амплітуд двох сигналів після БПФ: дозвіл БПФ 10 кГц.

Завдяки запропонованій паралельній архітектурі стала можлива обробка широкосмугових сигналів з частотою обробки нижче частоти Найквіста, що дозволяє використовувати комерційні ПЛІС для обробки в реальному часі.

Така архітектура-ключове рішення для РЛС з повністю цифровим широкосмуговим приймачем, де більше не потрібен супергетеродин: паралельна архітектура може використовуватися як цифровий інтерфейс для перетворення широкосмугових сигналів з пониженням частоти (обробка всієї робочої смуги), потім для вилучення необхідної миттєвої смуги сигналу застосовуються цифрове налагодження і вибірка.

Крім того, завдяки можливості управління широкосмуговими сигналами запропонована архітектура також може використовуватися в комунікаційних додатках та для ведення і протидії РЕБ.

3.2 Захист від перешкод

У РЛС повітряної розвідки необхідно враховувати вплив як пасивних, так і активних перешкод, а також шумів. В якості пасивних перешкод можуть виступати навмисні штучні відбивачі, підстилаюча поверхня (море) і об'єкти берегової лінії. Активні перешкоди організують за допомогою спеціальних радіолокаційних станцій. Станції постановки активних перешкод можуть приймати зондуючі сигнали (ЗС) атакується РЛС і формувати перешкоди на базі параметрів ЗС: випромінювати в напрямку атакується РЛС копію ЗС, модульовану по амплітуді, фазі, частоті, часу затримки і т. д. Станції радіоперешкод розміщують на захищаються об'єктах або поза ними.

В силу того, що організовані перешкоди істотно знижують ефективність роботи РЛС, необхідно передбачати Засоби захисту від радіоперешкод. Методи захисту від активних перешкод так чи інакше засновані на тому, щоб наскільки можливо "рознести" робочі параметри РЛС і перешкод: по робочій частоті, поляризації, в часі, просторі та ін. При цьому попередньо необхідно виявити наявність активної перешкоди як такої.

В рамках типової структури обробки даних в РЛС [15], що реалізується у вигляді первинної і вторинної обробки (обробки сигналів і даних), захист від активних перешкод неминуче зачіпає обидва етапи. Крім того, процесор

даних (вторинної обробки) повинен реалізовувати логіку перемикання різних варіантів захисту від активних перешкод, в разі, якщо якийсь з них не дає позитивного результату. Це призводить до застосування комплексного алгоритму, який повинен виконувати наступні завдання:

- Виявлення дії активної перешкоди;
- Розрахунок параметрів перешкоди;
- Вибір методу захисту.

Нижче наводиться систематичний виклад поширених на практиці методів боротьби з активними перешкодами, а також структура алгоритму, заснованого на даних методах.

3.2.1 Використання компенсаційної антени

Даний метод дозволяє здійснити захист від активної перешкоди, напрямком на яку не збігається з напрямком на ціль, тобто потрапляє в діаграму спрямованості приймальної антенної решітки збоку від її головного пелюстки. У приймальній антенній решітці поряд з основною використовується компенсаційна антена, діаграма спрямованості якої» накриває " діаграму основний в області поза головного пелюстки. Ідея методу полягає в тому, щоб з урахуванням коефіцієнта кореляції γ_{abc} між основним і компенсаційним каналом здійснити віднімання сигналу компенсаційного каналу з сигналу основного.

$$\gamma_{abc} = \frac{K_{cm}}{\sigma_c \sigma_m} \quad (3.1)$$

При цьому:

$$K_{abc} = M[(S_m - M[S_m])(S_c - M[S_c])]; \quad (3.2)$$

$$\sigma_s^2 = M[(S_c - M[S_c])^2]; \quad (3.3)$$

$$a = \{m, c\}. \quad (3.4)$$

де S_m – це сигнал, прийнятий у основному каналі; S_c – сигнал, прийнятий у компенсаційному каналі.

Сигнал після компенсаційної обробки у кожен момент часу: $S_{res}=S_m-r_{abc} \cdot S_c$.

У процесі первинної обробки по реалізації довжиною L у припущенні ергодичності сигналу і перешкоди (що справедливо, якщо інтервал усереднення достатньо короткий) вихідний сигнал $S_{res}[n]$ для моменту часу n розраховується по аналогічній формулі, але з заміною істинних значень вірогіднісних характеристик сигналів і перешкод їх вибірковими значеннями.

$$K_{abc}^{\circ} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (S_m[i] - S_m^-)(S_c[i] - S_c^-); \quad (3.5)$$

$$r_{abc}^{\circ} = \frac{K_{abc}^{\circ}}{\sigma_c \sigma_m}; \quad (3.6)$$

$$S_{res} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L S_{res}[i]; \quad (3.7)$$

$$(\sigma_{res}^{\circ})^2 = \frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^L (S_{res}[i] - S_{res}^-)^2 \quad (3.8)$$

$$a = \{m, c\}; \quad (3.9)$$

$$S_{res}[n] = S_{abc}[n] - r_{abc}^{\circ} \cdot S_c[n]. \quad (3.10)$$

Ефект максимального придушення активної перешкоди буде спостерігатися при попаданні її сигналу в максимум першого бічного пелюстки(Рис.3.13).

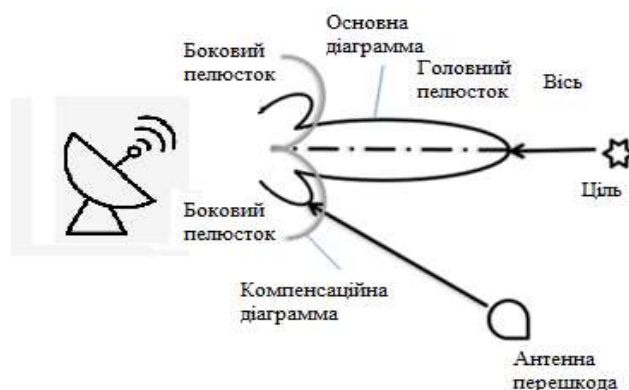


Рисунок 3.13 – Компенсація за допомоги компенсаційної антени

3.2.2 Використання «нулів» діаграми спрямованості.

Даний підхід має на увазі, що кутове положення активної перешкоди відомо і мало змінюється за короткі проміжки часу [16]. Для визначення кутового положення можна періодично робити паузи в зондуванні, приймаючи тільки заважає сигнал. Після визначення кутового положення необхідно "повертати «приймальну антенну решітку таким чином, щоб один з» нулів" дн антени припадав на напрямок активної перешкоди(рис.3.14). При такому підході сигнал від цілі не обов'язково буде завжди потрапляти в максимум основного пелюстки діаграми спрямованості приймальної антенної решітки, зате буде спостерігатися помітне придушення активної перешкоди. При точному ж попаданні мети в максимум основного пелюстки ефект придушення максимальний.

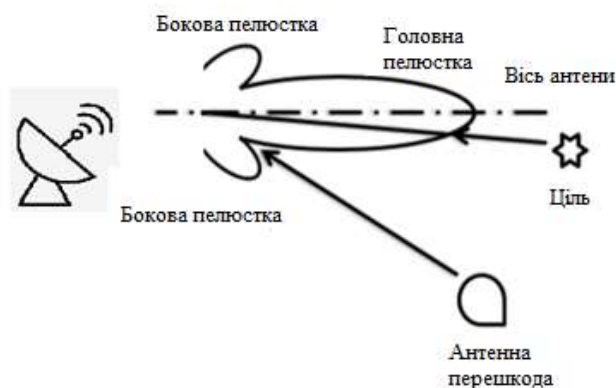


Рисунок 3.14 – Використання нулів ДН

3.2.3 Поляризаційний метод

Ще один метод захисту від активних перешкод заснований на застосуванні певних типів поляризації для опромінення мети. В системі необхідно передбачити по два канали випромінювання і прийому – з

горизонтальною і вертикальною поляризацією. Припустимо, сигнал активної перешкоди має кругову поляризацію, а Ціль опромінюється сигналом з вертикальною поляризацією [17]. Тоді сигнал перешкоди буде потрапляти в обидва приймальних каналу, а сигнал від мети – тільки в канал з вертикальною поляризацією. В такому випадку вертикальний канал можна використовувати в якості компенсаційного, процедури по відбудові від перешкоди аналогічні описаним вище.

3.3 Індикатори станції

Радіолокаційний індикатор-пристрій відображення радіолокаційної інформації в графічній, яркісній або цифровій формі. У радіолокаційних індикаторах застосовують електронно-променеві прилади (чорно-білого або кольорового зображення), світлодіодні, електролюмінісцентні і газорозрядні індикаторні панелі, рідкокристалічні індикатори [18]. На радіолокаційних індикаторах відображається інформація про наявність цілей, їх координати (дальність, азимут, кут місця, висота), про зміну цих координат у часі і просторі, про характеристику цілей (тип, розмір, кількість і т.д.). Найбільш широко застосовуються індикатори на електронно-променевих приладах. На екранах таких індикаторів сигнали, що випромінюються або відображаються метою, зображуються імпульсом або збільшенням яскравості світіння точки екрану. За допомогою радіолокаційного індикатора, званого індикатором кругового огляду (ІКО), можна відтворювати радіолокаційну обстановку в межах 360° . На екрані електронно-променевого приладу такого індикатора об'єкт відображається яркісною відміткою з достатнім після свіченням.

Ми будемо використовувати ІКО на базі звичайного монітору за допомогою нашого АЦП. Сигнал отриманий від прийомного пристрою виводиться на монітор за допомогою віртуальної моделі електро-променевої трубки(рис.3.15).

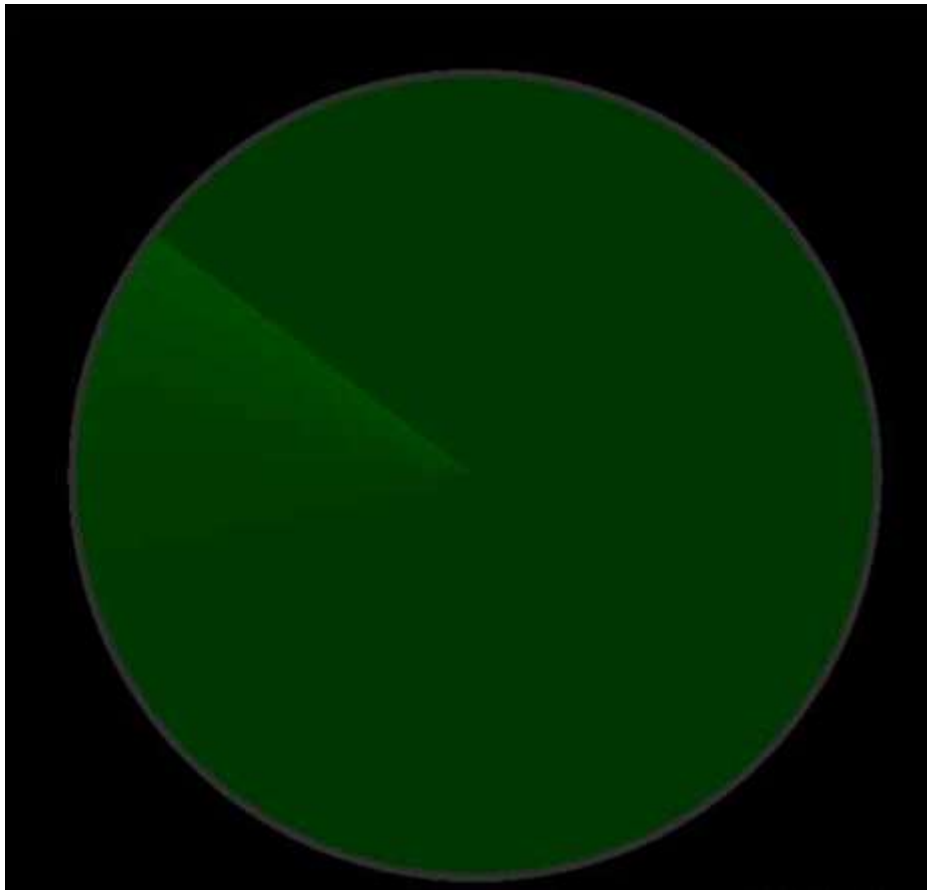


Рисунок 3.15 – ІКО для відображення виявлених СБЛА

Інформація на екрані (ІКО) відображається в координатах азимут – швидкість у вигляді міток і ліній [19]. Ця інформація являє собою сигнали цілей, які відображаються у вигляді яркістних відміток.

Видимість обертання променя створюється за рахунок послідовного формування променів (рис.3.16), зрушених один щодо одного на кут γ . Величина γ визначається тривалістю всього періоду по відношенню до тривалості одного імпульсу запуску розгортки (ІЗР). Зміни нахилу променя забезпечується синусоїдальної і косинусоїдальної модуляцією амплітуд пилкоподібних струмів подаються на ГПТ координат X і Y. при надходженні вихідної інформації з радіоприймального пристрою на підсилювач підсвічування на екрані індикатора відобразиться відповідний символ.

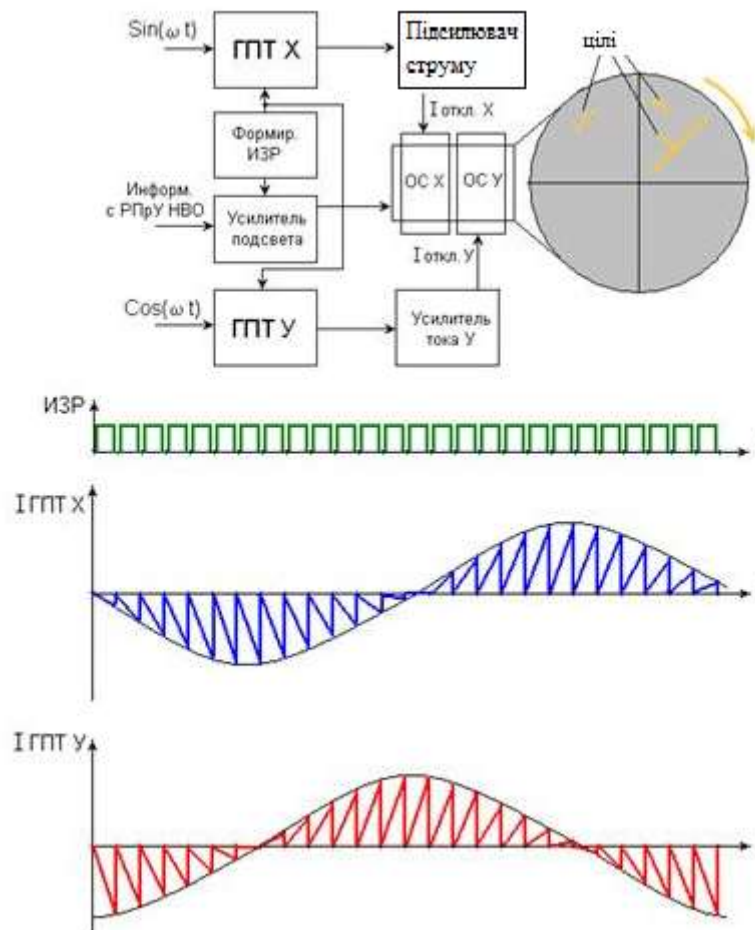


Рисунок 3.16 – Структурна схема ІКО і часові діаграми, що пояснюють принцип його роботи

Також потрібно врахувати можливість виведення вхідної інформації на зовнішній екран. Зробити це можливо через виділення додаткового зовнішнього контакту або за допомогою прямої трансляції через безконтактну передачу даних (сервіси Bluetooth або Wi-Fi). Тут вже залежить у якому режимі буде використовуватися РЛС. Якщо станція буде використовуватися у міських умовах без необхідності маскування систем виявлення то «бездротовий» метод буде більш зручним.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було проведено аналіз технічного завдання, літератури за темою розробки, та аналогічних систем виявлення БЛПА. Визначені основні вимоги до радіолокаційної станції виявлення середніх безпілотних літальних апаратів.

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження властивостей складних радіосигналів, визначення найбільш ефективних параметрів обладнання для отримання максимального результату виявлення СБЛА. Основну увагу при виборі довжини хвилі зондуючого сигналу було приділено сантиметровому та дециметровому діапазонам хвиль, при виборі методу огляду простору - методам з безперервною антеною та ФАР, при виборі виду зондуючого сигналу – імпульсному сигналу з малою шпаруватістю та ЛЧМ.

У ході дослідження було з'ясовано, що основною проблемою у виявлення СБЛА є схожість виявлених цілей з птахами через невеликі розміри цілі та використання у сучасних БЛПА пластику та композитних матеріалів, що погано віддзеркалюють радіосигнал. Також внаслідок високої чутливості приймального пристрою з'являється вразливість перед активними та пасивними перешкодами, що не допустимо в умовах необхідності виявлення СБЛА з високою якістю.

У разі використання сантиметрових хвиль отримуємо допустиму для заданої дистанції чутливість системи і можливість виявляти цілі, ЕПР яких досягає $0,3 \text{ м}^2$, що у свою чергу відповідає потребам практики. В роботі використана безперервна антена з одним радіопромінем, що забезпечило максимально можливу дистанцію розгалуження і як результат максимальну дистанцію виявлення.

У випадку з безперервною антеною використовується імпульсний сигнал з малою шпаруватістю, що забезпечує більшу вірогідність виявлення

цілей малих розмірів. У результаті отримали також можливість більш ретельно спостерігати траєкторію польоту цілі без потреби збільшення обертів антени.

Таким чином, забезпечується виявлення СБЛА на відстані до 25 км. Використовується довжина хвилі 6,6 см. Необхідна потужність зондувального сигналу - 4,4 кВт.

Отримані в роботі результати можуть бути використані на практиці при проектуванні систем радіолокаційного зондування повітряного простору і виявлення БПЛА.

Результати атестаційної роботи було подано у доповіді на 25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» на конференцію "Інформаційні радіотехнології та технічний захист інформації".

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Методичні вказівки до підготовки атестаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 171 «Електроніка» освітньої програми «Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа» / Упоряд.: В.М. Карташов.– Харків: ХНУРЕ, – 2020. – 36 с.

2. ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення: Введ. 2015-22-06. – К.: Вид-во стандартів, 2016 – 26 с.

3. В.А.Сергієнко, В.М.Карташов. Можливості виявлення оперативно-тактичних та тактичних безпілотних літальних апаратів // Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті. Т. 1 : Конференція "Інформаційні радіотехнології та технічний захист інформації " : матеріали 25-го Міжнар. молодіж. форуму, 17–19 квіт. 2021 р. / М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2021. С.49 – 50.

4. В.М. Карташов, В.Н. Олейников, С.А. Шейко. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. Вып. 195 – с.235 – 242.

5. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Korytsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. –New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.

6. V. Kartashov, V. Oleynikov , I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.

7. V. Kartashov, V. Oleynikov, O. Zubkov, S. Sheiko. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio

Electron-ics (UkrMiCo'2019), 9–13 September 2019, Odessa, Ukraine, 4 p.

8. I. Koryttsev, S. Sheiko, V. Kartashov, O. Zubkov, V. Oleynikov, I. Selieznov, M. Anohin. Practical Aspects of Range Determination and Tracking of Small Drones by Their Video Observation // 2020 International Scientific-Practical Conference. Problems of Infocommunications. Science and Technology. Kharkiv, Ukraine. October 6-9, 2020. – 5 p.

9. И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.М. Карташов, О.В. Зубков, В.Н. Олейников, С.И. Бабкин, И.С. Селезнев. Обработка сигналов при пеленгации и определении дальности до среднеразмерных БПЛА в радиолокационном диапазоне // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 125 – 134.

10. В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, О.В. Зубков, С.И. Бабкин. Оптико-электронные методы обнаружения воздушных 82 объектов и измерения их координат // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 153 – 159.

11. U. Jayamohan, "Not Your Grandfather's ADC: RF Sampling ADCs Offer Advantages," 2015.

12. "RF Sampling S-Band Radar Receivers," *Texas Instruments Design*, 2016.

13. J. G. Proakis and D. K. Manolakis, "Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Application," 4th Edition, *Pearson*, 2006.

14. "Mixed-Signal and DSP Design Techniques," *Analog Devices*, 2002.

15. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. – М.: Додэка-XXI, 2012, – 720с.

16. "Model-Based DSP Design Using System Generator, UG897," *Xilinx*, 2016.

17. "Power Analysis and Optimization, UG907," *Xilinx*, 2015.

18. Радиотехнические системы: Учебник для вузов / Ю. М. Казаринов [и др.]; Под ред. Ю. М. Казаринова. — М.: Академия, 2008. — 590 с.:

19. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И.

Бабкин, С.А.Шейко, И.С. Селезнев. Экспе-риментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37. 81