

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних пристроїв та систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

Сергій ЖУК

«__» _____ 2020 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою
«Радіотехнічні інформаційні технології»
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: «Радіолокаційна система малої дальності кругового обзору»

Виконав:

студент IV курсу, групи РТ-71
Шелігацький Ігор Вікторович

Керівник:

Доцент кафедри РТПС
к.т.н., доцент Чмельов Вячеслав Орійович

Рецензент:

Доцент кафедри РОС
к.т.н., доцент Лашевська Наталія Олександрівна

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломного проєкту

на тему: «Радіолокаційна система малої дальності кругового обзору»

Київ 2021 року

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт включає в себе ознайомлення та вивчення сучасних радіолокаційних систем, їх особливостей, а також розробку радіолокаційної системи кругового обзору малої дальності.

Метою проєкту є визначення основних тактико – технічних характеристик РЛС кругового обзору малої дальності. В ході роботи представлена структурна схема, а також розрахунки декількох блоків схеми, які на мою думку, потребували детального опису.

ANNOTATION

The diploma project includes acquaintance and studying of modern radar systems, their features, and also development of a radar system of a circular review of short range.

The purpose of the project is to determine the main tactical and technical characteristics of short-range circular radar. In the course of the work the block diagram is presented, and also calculations of several blocks of the scheme which in my opinion, required the detailed description.

Зміст

Анотація	3
Annotation.....	4
Перелік скорочень.....	2
Вступ.....	3
1 Теоретичні основи побудови радіолокаційних систем	5
1.1 Сучасні радіолокаційні системи моніторингу простору.....	5
1.2 Класифікація зондуючих сигналів радіолокаційних систем	10
1.3 Вимоги до сучасних радіолокаційних систем.....	14
2 . Особливості розробки радіолокаційної системи малої дальності	20
2.1 Проблеми контролю активності сучасних безпілотних апаратів ..	20
2.2 Особливості безпілотних літальних апаратів як об'єкту радіолокації	24
2.3 Вимоги до радіолокаційних систем малої дальності виявлення безпілотних літальних апаратів	26
3 розробка радіолокаційної системи малої дальності	28
3.1 Основні параметри радіолокаційних систем.....	28
3.2 Розробка структури радіолокаційної системи	30
3.3 Визначення параметрів антенної системи радіолокаційної системи малої дальності	35
3.4 Підсистема формування зондуючого сигналу	40
Висновки:	51
Перелік джерел посилань	52

					РТ71.464532.001 ПЗ			
ЗМ	Лист	№ докум	Підпис	Дата	<i>РЛС кругового обзору малої дальності</i>	Літ.	Лист	Листів
Розро-	Пеневі-	Шелігацький	Чмельов				1	
Н Кошт	Затвер-	ПІБ	ПІБ		РТ-71 РТФ			

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

РЛС — Радіолокаційна система

ТЗ — Транспортні засоби

БПЛА – Безпілотні літальні апарати

ЛЧМ – Лінійна частотна модуляція

ЗРК ППО – Зенітно – ракетний комплекс протиповітряної оборони

РЕР – Радіоелектронна розвідка

ЗКР – Зенітна керована ракета

ФАР – Фазова антенна решітка

РЕО – Радіоелектронне обладнання

АРМ – Автоматизоване робоче місце

СРНС – Супутникова радіонавігаційна система

ЕПР – Ефективна площа розсіювання

СРЦ – Селекція рухомих цілей

					<i>РТ71.464532.001 ПЗ</i>	Лист
						2
Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність. Радіолокація – це виявлення і розпізнання об’єктів за допомогою радіохвиль, а також визначення їх місцезнаходження і параметрів руху у просторі. Об’єкти радіолокації називають радіолокаційними цілями.

В наш час радіолокація отримала широке застосування. Її методи та засоби використовуються для виявлення об’єктів і контролю обстановки в повітряному, космічному і надводному просторах, використовується в метеорології і розвідці корисних копалин. Сучасна техніка дозволяє з великою точністю знаходити координати положення цілей, слідкувати за їх рухом, визначати не тільки форми об’єктів, але і структуру їх поверхні. Не кажучи вже про використання радіолокації в астрономії. З кожним днем радіолокація знаходить все нові й нові застосування в житті людини. Але якщо говорити про «наземні справи», то основне застосування радіолокації це організація управління рухом.

На сьогоднішній день постала нагальна задача радіолокації – виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА), як складної радіолокаційної цілі з малою ЕПР, великим діапазоном швидкості руху та здатністю пересуватися на малих та надмалих висотах. Зазначені властивості БПЛА, їх здатність переносити засоби ураження, вести несанкціоноване спостереження примушують розглядати БПЛА як суттєву загрозу для важливих об’єктів критичної інфраструктури держави.

Тому, постає актуальна задача моніторингу зон контролю над окремими об’єктами, які можуть стати предметом несанкціонованих дій безпілотних літальних апаратів.

Об’єкт дослідження: радіолокаційний моніторинг контрольного простору.

Предмет дослідження: радіолокаційна система кругового обзору малої дальності.

Мета роботи: визначити основні тактико – технічні характеристики РЛС кругового обзору малої дальності.

					<i>РТ71.464532.001 ПЗ</i>	Лист
						3
<i>Зм</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Для досягнення поставленої мети, необхідно виконати комплекс завдань:

- 1) Дослідити сучасні підходи до побудови радіолокаційних систем малої дальності.
- 2) Провести порівняльний аналіз радіолокаційних сигналів.
- 3) Вивчити особливості безполітних літальних апаратів як різновид радіолокаційних цілей.
- 4) Визначити основні тактичні і технічні параметри радіолокаційної системи малої дальності.
- 5) Розробити основні складові радіолокаційної системи кругового обзору малої дальності.

Під час виконання дипломного проєкту та проведення основних вузлів та елементів радіолокаційної системи, були використані методи теорії системного аналізу, перетворення Фур'є, положення теорії розповсюдження електромагнітних хвиль.

У дипломному проєкті були визначені основні параметри РЛС, розроблена структурна схема РЛС та для окремих вузлів РЛС малої дальності.. розроблено структурна, функціональна та принципова електрична схеми.

Розроблено підсистему формування зондуючого сигналу радіолокаційної системи кругового обзору малої дальності.

					<i>PT71.464532.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						<i>4</i>
<i>Зм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

1.1 Сучасні радіолокаційні системи моніторингу простору

В даний час радіолокаційні станції знайшли найширше застосування в багатьох сферах діяльності людини. Вони використовуються не тільки для визначення координат, характеристик руху різних об'єктів і навігаційних цілей, так само радіолокаційні станції застосовуються для розвідки корисних копалин, для охорони територій, для космічних досліджень і багато чого іншого. Далі описуються основні тактико-технічні характеристики і область застосування радіолокаційних станцій подібних тій, що розробляється в дипломному проекті.

В даний час на озброєнні армії іноземних держав є бойовий парк РЛС розвідки наземних цілей, що підрозділяються на класи:

- РЛС ближньої дії (типу AN / PPS 15 США);
- РЛС малої дальності (типу RB 12В Франція);
- РЛС середньої дальності (типу «Монітор» Росія і AN / PPS-5 США);
- РЛС великої дальності (типу Rasit і Ratak Німеччина).

Різновид РЛС розвідки наземних цілей, розроблених в 70-80 роки, представлений в основному станціями ближньої дії (до 20 найменувань). В даний час велика увага приділяється створенню РЛС середньої дальності, які забезпечують виявлення одиночного людини на видаленні 4-5 км і бронетехніки на видаленні до 10 - 12 км. При цьому в процесі створення сучасних РЛС середньої дальності основну увагу приділяється: автоматизації процесу виявлення цілі, що надає їм принципово нову якість по відношенню до парку існуючих РЛС цього класу; можливості встановлення цих РЛС на автотранспорті із забезпеченням автоматичного горизонтування антеною системи; підвищення надійності, зменшення її маси і енергоспоживання РЛС при забезпеченні високої роздільної здатності та точності вимірювання координат цілі [1].

РЛС розвідки наземних цілей 111L1 «Лис».

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						5
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата		

На рішення перерахованих вище завдань була спрямована розробка ХК «Укрспецтехніка» РЛС розвідки наземних цілей середньої дальності 111L1 «Лис». Головна відмінна риса РЛС «Лис» - робота в міліметровому діапазоні довжин хвиль, що полегшує вирішення низки технічних завдань: не створює перешкод радіотехнічним засобам; підвищує несприйнятливість до випадкових і навмисним перешкод; практично нешкідлива для здоров'я людини.

За принципом дії станція розвідки є когерентно-доплерівська РЛС безперервного випромінювання міліметрового діапазону з фазо-кодманіпульованим сигналом. РЛС «Лис» - це мобільний засіб виявлення цілі і встановлюється на автотранспорті. Вона забезпечує автоматичне виявлення рухомих цілей (людей і техніки) в будь-який час року і доби, в дощ, в пилу і в тумані при відсутності оптичної видимості.



Рис. 1.1.1 – РЛС «Лис-3М»

Антенна система РЛС має пару роздільних антен (приймальна й передавальна антени), чим забезпечується необхідна розв'язка між передавальним і прийомним каналом. Антени виконуються у вигляді параболоїда обертання. Опромінювач - круглий хвилевід. Приймальна передавальна антена розташовані симетрично щодо вертикальної осі обертання всієї антеною системи. Діаграма спрямованості антени близька до голчастою. Мала ширина діаграми спрямованості забезпечує необхідну кутову роздільну здатність РЛС.

					<i>PT71.464532.001 ПЗ</i>	Лист
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата		6

Приймально-передавальний пристрій РЛС виконано на основі транзисторів. Підсилювач потужності передавача і малошумний підсилювач високої частоти приймача розроблені в мікросмужковому виконанні. Процес виявлення цілі РЛС «Лис» здійснює при автоматичній адаптації порога виявлення місцевості і метеоумови. Виявлені мети (до 10) відображаються на рідкокристалічному дисплеї в наочному вигляді: яркісна відмітка, відповідна положенню мети з певними координатами пеленга і дальності. Поруч з яркісною відміткою відображається номер цілі, на вільному просторі екрану монітора відображається формуляр виявлених цілей в цифровому вигляді. Використовувані в РЛС алгоритми і програми цифрової обробки сигналів дозволяють здійснювати автоматичне виявлення і розпізнавання рухомих цілей і забезпечує надійне придушення перешкод. Характеристики РЛС розвідки наземних цілей «Лис» (українського виробництва ХК «Укрспецтехніка») наведені в таблиці 1.1.1. [2]

Таблиця 1.1.1 – Тактико – технічні характеристики РЛС «Лис»

Параметр	Значення
Зона обзору:	
- по азимуту, °	120
- по дальності, км	0...12
Час повного обзору:	
- в нормальних умовах, с	25
- у важкій завадній обстановці, с	50
Дальність виявлення цілей:	
- поодинокі людина, км	5,4
- автомобіль, моторна лодка, км	11,5
- вертоліт, км	12
Роздільна здатність:	
- по пеленгу, не гірше °	2
- по дальності, не гірше, м	25

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

7

Частота, ГГц	36
Потужність передавача, Вт	0,2
Діаметр розкриву антени, мм	400
Енергоспоживання, Вт	60
Маса апаратури, кг	30

Радіолокаційна станція охорони (РЛСО) призначена для забезпечення охорони складів техніки і майна, аеродромів та морських портів, авіабаз і морських баз, полігонів, нафтобаз, електростанцій, ділянок державного кордону і меж приватних володінь.

РЛСО призначена для забезпечення охорони як кордонів території, що охороняється, так і підступів до неї і всієї площі території від проникнення і переміщення по ній порушників. РЛСО забезпечує автоматичне виявлення порушників, вимір їх координат і наочну індикацію з прив'язкою до конфігурації території, що охороняється. РЛСО забезпечує виявлення рухомих людей і автотранспорту в будь-який час року і доби, при дощі з інтенсивністю 10 мм / год, в тумані з видимістю 10 метрів і в диму. Площа території, що охороняється 1-1,5 км². Межі зони охорони можуть оперативнo змінюватися при зміні конфігурації території, що охороняється. РЛСО дозволяє класифікувати тип виявлених порушників (одиначний людина, група людей, автотранспорт, тварина) по звукової індикації доплерівських сигналів і дозволяє виключити помилкові цілі. РЛСО працює в міліметровому діапазоні довжин хвиль, що дозволяє ефективніше вирішувати завдання виявлення рухомих об'єктів і має ряд переваг: мала маса і габарити, екологічна чистота через малу глибину проникнення випромінювань міліметрового діапазону в організм людини, несприйнятливості до перешкод, створюваних технічними засобами, відсутність перешкод для технічних засобів, що працюють поблизу від території, що охороняється [5].

РЛСО складається з стаціонарної РЛС, що забезпечує автоматичне виявлення порушників, і патрульної міні-РЛС, що забезпечує безпосередньо на мі-

Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

8

сцевості пошук порушників патрулем, які оперативно виїхали на місце порушення. Стационарна РЛС складається з інформаційного модуля і винесеного пульта управління, зв'язок між якими забезпечується по радіоканалу до видалення 3 км. Модифікації стационарної РЛС можуть монтуватися на автотранспорті. Комплектуючі РЛСО РЛС є автоматичними міліметровими когерентно-доплерівськими гомодинного РЛС з аналоговими фільтрами придушення перешкод від підстильної поверхні, адаптивним цифровим детектора, що працюють з урахуванням вимірювання рівня перешкод в кожному елементі простору і з автоматичним виміром координації [12].

Таблиця 1.1.2 - порівняння характеристик стационарної та мобільної РЛС

Параметр	Стационарна РЛС	Мобільна РЛС
Дальність виявлення:		
- людини	1,2	0,6
- автотранспорту	2	1
Роздільна здатність:		
- по азимуту	4°	8°
- по дальності	20 м	20 м
Випромінювана потужність:	25 мВт	15 мВт
Споживана потужність:	100 Вт	25 Вт
Маса	20 кг	6 кг

Вищенаведені радіолокаційні системи подібні до тієї, що розробляється в дипломному проєкті за призначенням, основних функцій і технічними характеристиками. Проектована РЛС так само призначена для спостереження за цілями на земній або водній поверхні і характеризується схожими технічними параметрами, такими як дальність дії, яку випромінює потужність, роздільна здатність і час огляду. Тобто існування подібних станцій не виключає можливості реалізації подібної роботи.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист
9

1.2 Класифікація зонduючих сигналів радіолокаційних систем

Під зонduючим радіолокаційним сигналом (ЗС) розуміють радіохвилю, випромнену передавальною антеною РЛС в простір із заданими параметрами.

У загальному випадку ЗС може бути представлений у вигляді:

$$x(t) = X(t) * \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t) + \varphi_0), \quad (1.2.1)$$

де $x(t)$, $\varphi(t)$ – закони амплітудної та фазової модуляції;

f_0 – несуча частота;

φ_0 – початкова фаза;

Вибір зонduючого сигналу є однією з найважливіших задач при проектуванні РЛС будь-якого призначення, так як його форма і параметри в значній мірі визначають тактико-технічні характеристики РЛС (дальність виявлення мети, захищеність від активних і пасивних перешкод, потенційну точність вимірювання дальності, роздільну здатність по дальності та ін.

У радіолокаційних станціях застосовуються різні види зонduючих сигналів:

- безперервні немодульовані;
- безперервні амплітудно-модульовані;
- безперервні частотно-модульовані;
- імпульсні.

Вибір того чи іншого виду зонduючого сигналу залежить від характеру розв'язуваних РЛС завдань і умов її функціонування. У РЛС, як, втім, і в більшості РЛС іншого призначення, застосовуються імпульсні зонduючі сигнали.

За своєю структурою зонduючі радіоімпульси можуть бути: поодинокими і груповими (або послідовностями радіоімпульсів);

- когерентними і некогерентними;
- простими і складними.

Поодинокі імпульси застосовуються досить рідко. Виявлення мети і виміри її координат зазвичай здійснюються на основі аналізу групи відбитих від цілі радіоімпульсів - "пачки", що містить M радіоімпульсів. [7]

Радіоімпульси називаються некогерентними, якщо початкова фаза височастотних коливань від імпульсу до імпульсу є невідомою величиною.

Радіоімпульси називаються когерентними (від лат. "Cohaerentia" - зчеплення, зв'язок), якщо початкова фаза коливань кожного радіоімпульсу однакова або від імпульсу до імпульсу змінюється за певним законом.

Простими (або вузькосмуговими) називаються радіоімпульси, у яких добуток ширини спектра Π_i і тривалість імпульсу τ_i (база сигналу) становить величину порядку одиниці:

$$\Pi_i * \tau_i \approx 1.$$

Складним (або широкосмуговим) імпульсним сигналом називається сигнал, якщо його база

$$n = \Pi_i * \tau_i \gg 1.$$

Перевагою вузькосмугових сигналів є відносна простота їх формування та оптимальної обробки. Формування таких імпульсів забезпечується шляхом досить простий імпульсної модуляції генератора НВЧ, а квазіоптимальним фільтром є ППЧ приймача з узгодженою шириною смуги пропускання ($\Delta f_{\text{упч}}$):

$$2 * \Delta f_{\text{упч}} \approx \frac{1.37}{\tau_i} \quad (1.2.2)$$

Такий квазіоптимальний фільтр в порівнянні з оптимальним дає програш у відношенні "сигнал / шум" по потужності всього в 1,2 рази.

Прості сигнали застосовувалися в перших імпульсних РЛС і знаходять широке застосування і в даний час зважаючи на простоту технічної реалізації відповідних пристроїв генерування та обробки.

Однак таких сигналів властиві істотні недоліки, що обмежують тактико-технічні характеристики РЛС, про що буде сказано нижче.

В останні роки в радіолокації все ширше стали застосовуватися складні сигнали переважно двох видів:

1) радіоімпульси з внутрішньоімпульсною частотною модуляцією, зокрема з лінійної частотної модуляцією (ЛЧМ) або з нелінійної частотної модуляцією (НЧМ);

2) радіоімпульси з фазової маніпуляцією (від лат. "Manus" - рука) при якій фаза коливань всередині імпульсу через певні інтервали стрибком змінюється на π . Оскільки ці стрибкоподібні зміни фази відбуваються за певним бінарного коду, такі імпульси називаються фазокодоманіпульованими. (ФКМ).

Природно, в порівнянні з простими радіоімпульсами формування і обробка складних радіоімпульсів є складнішим завданням, але застосування таких сигналів дозволяє істотно підвищити якісні характеристики РЛС. Тому в сучасних РЛС РТВ в основному застосовуються складні зондувальні сигнали. [9]

Основними параметрами зондуючих сигналів є:

1. Довжина хвилі – λ
2. Імпульсна потужність - P_i
3. Частота (період) повторення імпульсів - $F_i(T_i)$
4. Середня за період повторення потужність - P_c
5. Довжина імпульсу - τ_i
6. Несуча частота коливань - f_0
7. Ширина спектру сигналу - Π_i

Несуча частота f_0 може бути різною в залежності від робочого діапазону хвиль РЛС. Вся радіолокаційна техніка заснована на використанні радіохвиль УКХ діапазону, що мають довжину хвилі менше 10 метрів.

Важливою частотною характеристикою сигналів є їх спектр.

Енергетичний спектр зондуючого сигналу можна визначити як розподіл уздовж осі частот його енергії.

Область частот, в межах якої зосереджена основна частина всієї енергії сигналу, називається шириною спектру $\Delta f_c (\Pi_i)$. Зазвичай ширина спектра визначається смугою частот, де зосереджено $\sim 90\%$ енергії сигналу. Наприклад, ширина спектра прямокутного відеоімпульсу дорівнює $\Pi_i = \frac{1}{\tau_i}$

Зондувальний сигнал і його спектр пов'язані між собою парою перетворень Фур'є: прямим, відповідно до якого здійснюється перехід від тимчасового уявлення до частотного і зворотним, що дозволяє перейти від частотного подання сигналу до тимчасового

У РЛС знаходять широке застосування ЗС у вигляді пачки радіоімпульсів:

$$x(t) = \sum_{k=1}^M X_k[t - (k - 1)T] \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k[\cdot] \varphi_k) \quad (1.2.3)$$

де $X[\cdot]$, $\varphi_k[\cdot]$ - функції, що визначають відповідно закони і амплітудної і фазової модуляції окремого імпульсу послідовності;

T - період повторення імпульсів;

M - число імпульсів в послідовності;

φ_k - початкова фаза k -го імпульсу.

Послідовність прямокутних радіоімпульсів, що мають період повторення T , має вигляд

Якщо початкова фаза радіоімпульсів φ_k в послідовності постійна або змінюється за відомим законом, то така послідовність когерентная.

Послідовність прямокутних радіоімпульсів, що мають період повторення T , має вигляд:

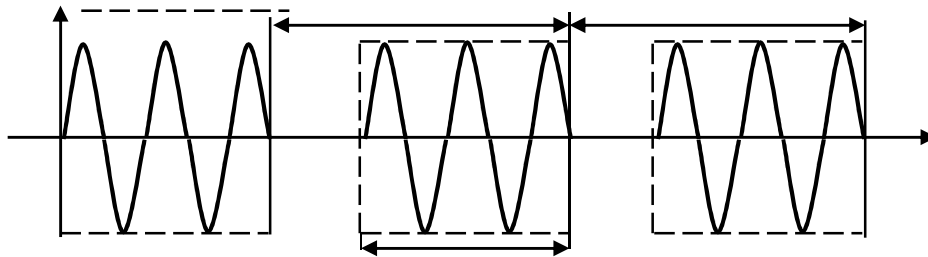


Рис. 1.2.1- Пачка радіоімпульсів

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

13

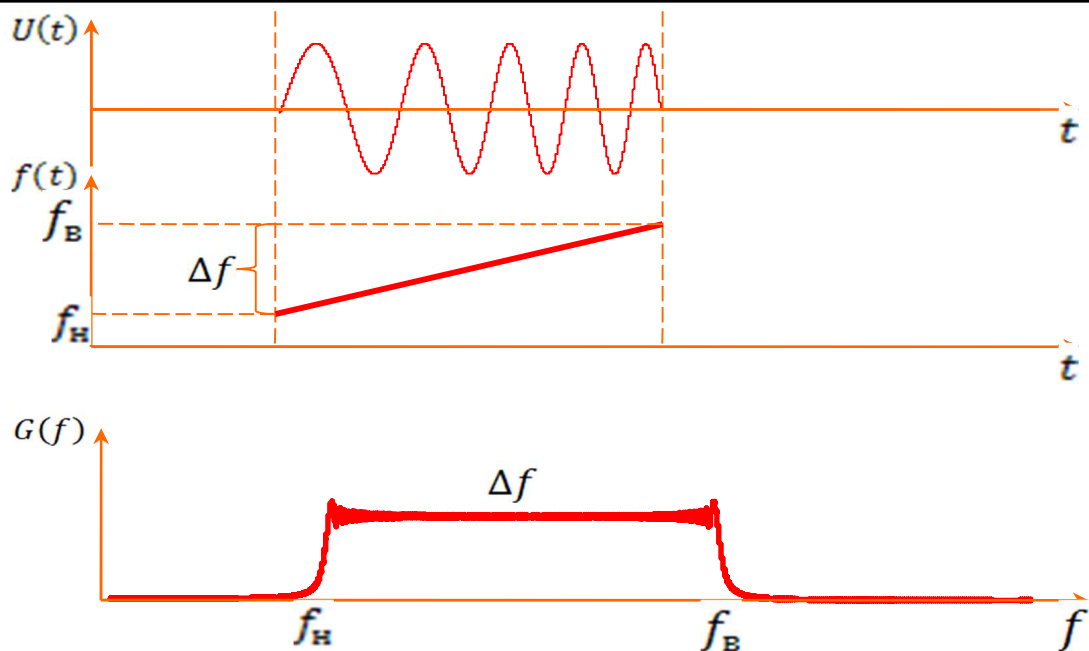


Рис. 1.2.2 – ЛЧМ сигнал та його АЧС

ФКМ радіоімпульс складається з ряду примикаючих один до одного прямокутних парціальних радіоімпульсів, що мають однакову тривалість T_0 і частоту, а початкові фази φ змінюються за певним законом. [3]

1.3 Вимоги до сучасних радіолокаційних систем

Система охорони периметра об'єкта повинна відповідати наступним загальним вимогам:

- забезпечувати виявлення порушника на підступах і при спробі проникнення на об'єкт;
- сигнал про проникнення повинен синхронізуватися з відповідною відеокамерою або тепловізором, інформація від яких дозволяє оператору прийняти рішення в реальному часі;
- вона повинна працювати цілодобово в будь-яких погодних умовах;
- забезпечувати стійкість до впливу зовнішніх факторів (розгойдуються дерева, поява тварин і ін.).

Традиційно охорона периметра забезпечується за допомогою різних датчикових систем, які встановлюються по периметру об'єкта. Датчики, як правило, працюють на основі фізичних принципів дії - сейсмічні, радіопроменеві, емнісні, інфрачервоні і ін. Подібні системи в цілому справляються зі своїм завданням, однак мають ряд недоліків.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

По-перше, для датчикових систем характерна низька достовірність спрацьовувань, по-друге, відсутня відеоінформація, на основі якої співробітники служби безпеки повинні приймати рішення. Тому, коли на периметрах об'єктів великої протяжності спрацьовує датчик, служба безпеки не знає, як реагувати на ці сигнали.

Рішенням цієї проблеми може бути зниження порога чутливості датчиків. В такому випадку системи спрацьовують набагато рідше, проте можуть пропустити реального порушника.

В даний час з'явилися радіолокаційні системи охорони периметра цивільного застосування, які дозволяють захистити об'єкт великої протяжності ефективніше, ніж поширені датчикові кошти. [5]



Рис. 1.3.1 – Радіолокаційна станція охорони периметру (РЛС)

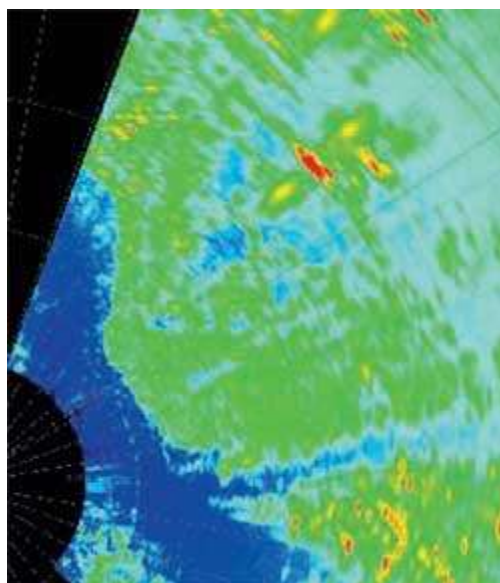


Рис. 1.3.2 – Радіолокаційна карта місцевості

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Радіолокація, метод виявлення і визначення місцезнаходження об'єктів за допомогою радіохвиль. Ці хвилі випромінюються радіолокаційною станцією, відбиваються від об'єкта і повертаються на станцію, яка аналізує їх, щоб точно визначити місце, де знаходиться об'єкт. До складу таких систем входить один або кілька когерентних дальнісно-доплерівських імпульсних радіолокаторів Ку-діапазону. Когерентний метод радіолокації заснований на виділенні і аналізі різниці фаз відправленого і відбитого сигналів, яка виникає через ефект Доплера, коли сигнал відбивається від рухомого об'єкту. При цьому передавальний пристрій може працювати як безперервно, так і в імпульсному режимі. Основною перевагою даного методу є те, що він дозволяє спостерігати тільки рухомі об'єкти, а це виключає перешкоди від нерухомих предметів, розташованих між приймальною апаратурою і метою або за нею.

Радіолокаційні системи охорони периметра і території об'єкта можуть працювати спільно з раніше встановленими системами, виконувати свої функції в складі інтегрованої системи безпеки спільно з системою відеоспостереження і тепловізором. [14]

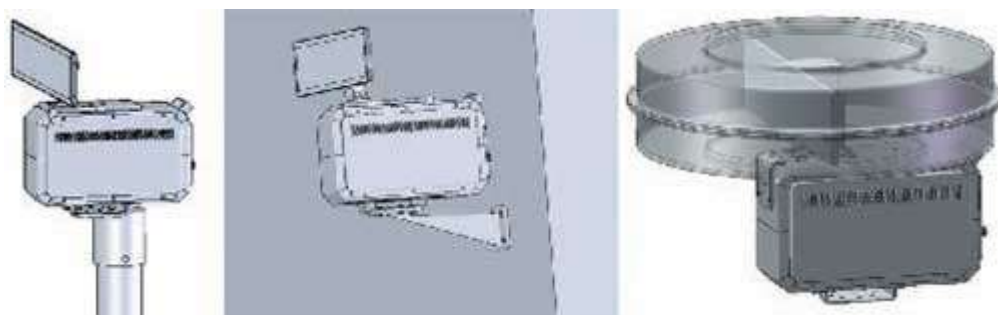


Рис. 1.3.3 – Варіанти встановлення РЛС охорони периметрів і території об'єктів

РЛС охорони периметра і території об'єкта призначені для цілодобової, всепогодної охорони за допомогою радіолокаційного спостереження території, виявлення рухомих цілей, вимірювання їх координат і швидкості, розпізнавання класу і автосупровід виявлених цілей.

Такі системи на відстанях до 1 км по людині і 1,5 км по автомобілю в секторі огляду до 360 ° виявляють і розпізнають цілі, визначають їх координати і швидкість пересування.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

РЛС охорони периметру і території об'єктів дозволяють забезпечити видачу сигналів оператору за фактом виявлення мети всередині попередньо встановлених тривожних зон. У таких системах реалізована можливість прив'язки графічного плану об'єкта до радіолокаційної карти.

Середній рівень електромагнітного випромінювання РЛС становить 25 мВт, що є вкрай низьким для подібних пристроїв (випромінювання не більше, ніж від стільникового телефону).

Використання РЛС охорони периметра і території об'єктів також вигідно з економічної точки зору. Подібні пристрої, пропоновані деякими вітчизняними розробниками, мають низьку питому вартість охорони погонного кілометра (квадратного кілометра) периметра (території об'єкта).

РЛС складаються з антени, зовнішнього модуля, адаптера, сервера і автоматизованого робочого місця (АРМ). Сервер і АРМ можуть бути об'єднані на одному комп'ютері. В іншому випадку АРМ підключається до сервера за допомогою локальної обчислювальної мережі.

Установка РЛС повинна проводитися на ділянці з прямою оптичною видимістю (відсутність на контрольованій території недоступних ділянок). Висота установки зовнішнього обладнання вибирається виходячи з умов оптимального забезпечення контролю території, що охороняється. Як правило, піднесення антени над навколишньою місцевістю складає від 1 до 30 м.

При установці зовнішнього обладнання слід виключити можливість виникнення механічних перешкод при повноповоротному скануванні антени в горизонтальній площині.

Час збирання подібних виробів становить не більше 20 хвилин.

Монтаж РЛС охорони периметра і території об'єктів може здійснюватися на горизонтальну поверхню, на стіну або на щоглу з використанням стандартних кронштейнів для систем відеоспостереження.

Залежно від розміру і конфігурації об'єкту, що охороняється в складі РЛС використовується різний набір обладнання. [12]

					<i>РТ71.464532.001 ПЗ</i>	Лист
						17
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата		

У базовому варіанті система складається з одного комплексу зовнішнього обладнання і АРМ оператора (комп'ютер зі спеціальним програмним забезпеченням: сервер, клієнт).

Зовнішнє обладнання встановлюється на узвишші щодо навколишньої місцевості, наприклад, на даху будівлі, до нього кабелями підводяться харчування 220 В, лінії передачі даних. Дані від зовнішнього обладнання передаються на робоче місце оператора.

У базовому варіанті з мережевою архітектурою дані від зовнішніх пристроїв передаються на сервер, а результати обробки направляються на клієнтські комп'ютери по локальній обчислювальній мережі Ethernet.

На додаток до такого варіанту сервер комплектується платами відеозахоплення на N каналів. У систему входять N поворотних відеокамер або тепловізорів, призначених для наведення на виявлені цілі за вказівками РЛС.

На клієнтські комп'ютери, крім інформації РЛС, передаються потоки відеоданих від поворотних камер (тепловізорів).

У РЛС охорони периметра і території об'єктів може бути реалізована функція мережі. Таким чином, існує можливість установки декількох РЛС на одному об'єкті. У подібному випадку мережа містить K одиниць зовнішнього обладнання РЛС, N поворотних відеокамер і M серверів. K, N і M визначаються вимогами до системи, продуктивністю серверів і пропускнуою спроможністю каналів зв'язку. У систему вводиться новий структурний елемент: магістральний канал виділеної мережі 1 Гбіт Ethernet. Схема мережі визначається конфігурацією об'єкту, що охороняється. Клієнтський додаток відображає інформацію з одного з РЛС і відповідних поворотних відеокамер (тепловізорів). [1]

Варіант практичного застосування РЛС охорони периметра і території об'єктів для безпеки аеропортів.

Завдяки здатності забезпечувати цілодобову, всепогодний охорону об'єктів, РЛС здатні вирішувати завдання безпеки особливо важливих об'єктів.

Використання РЛС охорони периметра і території об'єктів допоможуть уникнути подібних катастроф у аеропортах.

РЛС охорони периметра і території об'єктів забезпечують охорону об'єкта та підступів до нього, що може допомогти запобігти проникненню тварин, людей і автотранспорту на злітно-посадочної смуги.

Залишається додати, що спектр застосування РЛС не обмежується охороною аеропортів. Подібні системи будуть корисні для захисту державних і комерційних об'єктів різного призначення.

Висновок:

В даному розділі було досліджено підходи до побудови радіолокаційних систем малої дальності. Розглянуто їх особливості, а також приведено приклади сучасних РЛС, які широко використовуються та розроблюються в Україні. Було представлено порівняння тактико – технічних характеристик стаціонарної та мобільної радіолокаційної системи.

Описано важливість вибору зондуючого сигналу в радіолокаційних системах і їх різновиди.

- нанесення ударів по наземним / надводних цілям, самостійно або ношеними засобами ураження;
- постановка радіоелектронних перешкод;
- цілевказівки для інших засобів ураження, а також коригування їх застосування;
- транспортування і доставка вантажів і коштів в заданий район;
- ретрансляція даних між віддаленими абонентами мереж зв'язку;
- відволікання уваги або використання їх в якості помилкових повітряних цілей.

Терористичні угруповання і особи, які ведуть протизаконну діяльність, застосовують БПЛА (переважно - малі БПЛА) для вирішення наступних завдань:

- доступу за периметр охоронюваних об'єктів і ведення там спостереження;
- точкове знищення окремих важливих осіб;
- закидання саморобних засобів ураження;
- нанесення ушкоджень будівлям, пам'ятникам культури, об'єктів інфраструктури і транспортних засобів;
- транспортування заборонених засобів або їх закидання на охоронювану територію;
- перешкоджання повітряному руху в аеропортах. [4]

Основними перевагами БПЛА, що утрудняє завдання їх виявлення і протидії, є:

- можливість віддаленого виконання завдань при безпечну відстань оператора, і при цьому, забезпечення оператора інформацією про хід виконуваного завдання практично в реальному масштабі часу;
- застосування широкого спектра малогабаритних цільових навантажень на сучасній елементній базі (радіолокаційних станцій (РЛС), засобів радіоелектронної розвідки (РЕР), бойових частин з направленим враженням і інші);
- можливість тривалого перебування над зоною бойових дій, а також можливість самостійного придушення або ураження засобів ППО;

- низька помітність БПЛА в радіолокаційному та оптичному діапазоні за рахунок більш низьких масогабаритних характеристик, по порівнянню з пілотованими літальними апаратами (ЛА), і широкого застосування в конструкції БПЛА пластикових і композитних матеріалів;

- можливість здійснювати маневри з високими перевантаженнями і використовувати режими польоту, що призводять до зниження ефективності існуючих і перспективних засобів ППО - можливість польоту на гранично малих висотах (до 50 м) з використанням захисних властивостей рельєфу місцевості, а також на низьких швидкостях польоту (1 - 15 м / с). При цьому більшість сучасних ЗРК мають обмеження на обстріл повітряних цілей при їх мінімальній висоті до 1 км і мінімальної швидкості до 100 м / с. Крім того, при прийомі відбитих сигналів РЛС від малорозмірних, малошвидкісних БПЛА можливо їх потрапляння в строби захисту РЛС від пасивних перешкод і стаціонарних предметів (що робить БПЛА невиразними для РЛС на тлі місцевості або в хмарі пасивних перешкод);

- малі геометричні розміри, що зумовлюють низькі значення ймовірностей радіолокаційного виявлення (ефективна площа розсіювання від 0.01 до 0.3 м²), а також призводять до неспрацьовування зенітних керованих ракет (ЗКР) при їх підльоті в район малорозмірної цілі;

- скритність застосування БПЛА, що забезпечується відносною бісгучністю їх двигунів, а також за рахунок польоту в режимі «радіо-мовчання» до виходу їх в зону безпосереднього бойового застосування.

Перспективним напрямком підвищення ефективності БПЛА являється групове застосування малих дешевих БПЛА у вигляді «зграї» («рою»), коли вони об'єднуються в групи і за умови чіткого розподілу ролей. Такі групи БПЛА за рахунок своєї масовості можуть ефективно долати середовища РЕП і ППО і виконувати різні бойові завдання. [4]

Основними недоліками БПЛА є:

- обмеження щодо застосування в залежності від часу доби і погодних умов для окремих категорій БПЛА;
- низька інтелектуальність дій в автономному режимі;
- низька скритність каналів радіоуправління (КРУ) і передачі даних;
- низька живучість конструкції;
- схильність КРУ і каналу супутникової навігації БПЛА впливів-ствию радіоелектронних перешкод;
- порівняно невелика дальність дії дистанційного керування БПЛА з пунктів управління (ПУ) при відсутності додаткових коштів ретрансляції;
- обмеження по масі і складу корисного навантаження.

Розглянемо деякі з вищевказаних недоліків БПЛА більш докладно.

Наявність значних обмежень застосування БПЛА в залежності від погодних умов. Використання БПЛА можливо лише в сприятливих умовах, наприклад, при швидкості вітру менше 10 м / с. Застосування малих БПЛА істотно утруднено при сильному дощі (зливі), в умовах високою вологості повітря, при середньому і сильному тумані. [4]

Низька живучість і стійкість БПЛА до фізичного впливу будь-якого роду, від попадання уламку(кулі) до сильного пориву вітру, що приводить до втрат просторового орієнтування, і зриву БПЛА в неконтрольовані режими прольоту. Кожне істотне зовнішнє обурення (різкий порив вітру, висхідний або спадний повітряний потік, потрапляння БПЛА в повітряну яму) може привести до втрати орієнтації БПЛА і подальшої аварії .

Низький рівень технічної надійності і «інтелектуальності» дій-ствий БПЛА в автономному режимі. З досвіду застосування БПЛА в локальних війнах фахівцями зроблено висновок про те, що частота аварій БПЛА в 100 разів вище, ніж пілотованих ЛА. Основними причинами цього є значно менша надійність бортового радіоелектронного обладнання (РЕО) на борту БПЛА і відсутність дублювання функцій основного РЕО зважаючи малій вантажопідйомності БПЛА, на відміну від пілотованих ЛА. Традиційно БПЛА

оснащується комплектом мінімально необхідної апаратури. До переліку такої бортової апаратури можна віднести :

- навігаційну систему (автономну або засновану на використанні сигналів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС));

- систему зв'язку, що включає в себе каналобразуючої апаратуру КРУ, по якій здійснюється управління БПЛА з ПУ і передаються телеметричні дані про стан обладнання БПЛА, а також каналобразуючої апаратури передачі даних від цільового навантаження;

- цільову навантаження (апаратуру розвідки або засоби ураження).

Крім того, при збоях в роботі пілотованого ЛА льотчик в ряді випадків здатний швидко діагностувати і виправляти трапилася під час польоту аварійну ситуацію, усунути несправність, взяти на себе ручне управління і т.д., а при експлуатації БПЛА такі дії в польоті провести неможливо. Висока вразливість БПЛА від різних факторів бойової обстановки і їх низька «інтелектуальність» в автономному режимі, зважаючи на відсутність таких незамінних людських якостей, як оперативне ухвалення рішення, можливість перенесення основних зусиль на нові, більш важливі об'єкти, розуміння ухилятися від небезпеки і оперативно застосовувати заходи до обману противника, введенню його в оману і т.д. є сьогодні нерозв'язними проблемами, що знижують ефективність бойового застосування сучасних БПЛА. [2]

2.2 Особливості безпілотних літальних апаратів як об'єкту радіолокації

Сучасні легкі безпілотники мають невелику величину ефективної площі розсіювання від 0.01 до 0.3 м² :

Малі БПЛА роблять з композитних матеріалів і пластика зі спеціальною забарвленням і з особливою комбінацією шарів, їх невеликі бензинові і тим більше електричні двигуни мало випромінюють тепла і працюють майже безшумно. Тому, для ефективного виконання завдання необхідно одночасне використання декількох способів виявлення.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

24

Основними способами виявлення малих БПЛА в електромагнітному спектрі є:

- використання тепловізора інфрачервоного діапазону ЕМ хвиль;
- використання камер оптичного діапазону ЕМ хвиль;
- використання радіолокаційних станцій;
- здійснення радіомоніторингу.

Основним засобом виявлення БПЛА є радіолокаційні станції. У ряді випадків малі БПЛА є складною метою для існуючих РЛС. Ці апарати мають малу ефективну площу розсіювання (ЕПР), через чого їх виявлення стає досить складним завданням. Зокрема, знижується максимальна дальність виявлення. Розрахункові дальності виявлення малих БПЛА радіолокаційними станціями, при різних значеннях ЕПР БЛА, складають:

- 8 – 14 км - РЛС метрового діапазону для БПЛА з ЕПР близько 0.1 м^2 і $0.1 - 1.5 \text{ км}$ для БПЛА з ЕПР 0.01 м^2
- 9 – 16 км - РЛС дециметрового діапазону – (ЕПР = 0.1 м^2) і $0.8 - 2.0 \text{ км}$ (ЕПР - 0.01 м^2)
- 1.2 – 2.5 км - РЛС сантиметрового діапазону – (ЕПР = 0.1 м^2)

З огляду на установку на них антирадарних покриттів, найбільшу ефективність дає застосування двухчастную імпульсних радіолокаторів. перша група частот в дециметровому діапазоні, друга в сантиметровому для виявлення малих БПЛА. [10]

Використовуються комплекси, що працюють як на одному з методів виявлення, так і поєднують кілька методів, що з урахуванням складності завдання виявлення малих БПЛА, є найкращим рішенням. Найбільш ефективним рішенням є комбінування основних способів виявлення: використання радіолокаційних засобів, обладнання радіомоніторингу, ІК і оптичних відеокамер. Даний варіант є дорогим, але кожен з методів доповнює інший, і, таким чином, зменшується кількість помилкових виявлень і збільшується загальна ефективність системи.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

Завданням модуля радіолокаційних засобів є безпомилкове виявлення БПЛА на максимально великій відстані в умовах зі складною радіолокаційною обстановкою і зібрати інформацію, необхідну для проведення аналізу, до якої відноситься швидкість БПЛА, дальність до нього, а також визначення типу об'єкту. Загальна ефективність системи залежить як від індивідуальної характеристик передавача, антени, приймача, злагодженої роботи між ними, так і від методу радіолокації.

З огляду на специфіку поставленого завдання, яку необхідно вирішити, необхідно знайти компроміс між потужністю передавача і діапазону хвиль, розмірами антени і діаграми її спрямованості, здібностях приймача обробити інформацію, що надходить інформацію та вибору підходящого методу радіолокації, такого як частотний, фазовий і імпульсний. Завдяки оптимальній комбінації матеріально технічних ресурсів можливе виявлення БПЛА на великих дистанціях, а також можливість розпізнавати дрони зі слабо вираженими розвідознаками.

2.3 Вимоги до радіолокаційних систем малої дальності виявлення безпілотних літальних апаратів

Виходячи з актуальності задачі виявлення БПЛА біля окремих об'єктів охорони, РЛС малої дальності, що є предметом дослідження дипломного проєкту, повинна моніторити простір в радіусі до 3 км. Здійснювати огляд периметру на 360 градусів або у визначеному оператором секторі. Роздільна здатність даної РЛС не гірше, ніж 5 м між двома БПЛА. Очікувана швидкість БПЛА до 15 м/с.

При цьому, РЛС повинна виявляти БПЛА, які рухаються з дуже малою швидкістю або безпосередньо «завмирають» на місці. Ймовірність виявлення радіолокаційної цілі - не гірше, ніж 0.8, при цьому ймовірність хибної тривоги – не більше 0.001. Автоматизоване робоче місце оператора обладнується на

відстані до 50 м від розташування безпосередньо антенної системи і канал передачі даних між АРМ та РЛС повинен задовольняти ефективну роботу в реальному масштабі часу без втрат радіолокаційної інформації.

З урахуванням розповсюдження БПЛА, постає необхідність у забезпеченні неперервного моніторингу руху БПЛА навколо об'єктів охорони. Тому, відповідно, повинна зрости кількість РЛС, які зможуть контролювати та виявляти БПЛА. Такі РЛС повинні бути компактними, простими, надійними та мати малу вартість. Інтерфейс АРМ повинен бути простим і інтуїтивно зрозумілим для користувача і передбачати подання сигналу тривоги та оповіщення, у разі виявлення цілі в зоні контролю.

Для ефективної роботи РЛС кругового обзору, доцільно розташовувати її антенну систему у найвищій точці об'єкту охорони. Тому, конструктивні елементи РЛС повинні мати ступінь захисту не нижче, ніж IP68, щоб працювати у несприятливих погодних умовах.

Висновок:

Безпілотні літальні апарати несуть велику загрозу в руках терористичних угруповань та осіб, які ведуть незаконну діяльність. В даному розділі було описано важливість радіолокаційних систем у виявленні безпілотних літальних апаратів. Їх переваги та недоліки. Також були розглянуті вимоги до розробки РЛС малої дальності, для охорони об'єктів.

					<i>РТ71.464532.001 ПЗ</i>	Лист
						27
<i>Зм.</i>	<i>Лис.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3 РОЗРОБКА РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МАЛОЇ ДАЛЬНОСТІ

3.1 Основні параметри радіолокаційних систем

Радіолокаційні системи мають наступні переваги: робота РЛС не залежить від наявності оптичної видимості і ефективна не тільки в денні, а й в нічні години, в тумані, при дощі та снігопаді. Вони забезпечують велику дальність дії і точність вимірювання координат цілі. [14]

В даному курсовому проєкті проведено розрахунок РЛС кругового огляду, призначення для виявлення повітряних цілей. Дана РЛС може використовуватися, наприклад, в аеропортах і подібних установах. Проектована РЛС є поєднаною, тобто використовує одну антену для прийому і передачі сигналів.

Максимальна дальність виявлення:

$$R_{max} = 3000 \text{ м}$$

Роздільна здатність:

$$D_r = 5$$

Вірогідність хибної тривоги:

$$P_{xt} = 0.001$$

Вірогідність правильного виявлення:

$$P_b = 0.8$$

Розрахунок тривалості стисненого імпульсу:

$$t_i = 2 * \frac{D_r}{c} = 3.33 * 10^{-8} \text{ (с)} \quad (3.1.1)$$

де c – швидкість світла;

Розрахунок ширини спектру зондуючого сигналу:

$$F = \frac{1}{t_i} = 3 * 10^7 \text{ (Гц)} \quad (3.1.2)$$

Розрахунок швидкості обертання антени за хвилину:

$$V_a = \frac{N * 360}{60} = 36 \left(\frac{\text{град}}{\text{с}} \right) \quad (3.1.3)$$

де N – кількість обертів антени за хвилину;

Визначимо період та частоту, з яким антена випромінює імпульси.

$$T_a = \frac{2 * R_{max}}{c} = 2 * 10^{-5} \text{ (с)} \quad (3.1.4)$$

$$F_a = \frac{1}{T_a} = 5 * 10^4 \text{ (Гц)} \quad (3.1.5)$$

В даній радіолокаційній системі сигналом виступає ЛЧМ, тому розрахуємо тривалість імпульсу а також сліпу зону РЛС.

$$t_s = t_i * K = 1.067 * 10^{-6} \text{ (с)} \quad (3.1.6)$$

, де $K = 32$ – коефіцієнт стиснення сигналу (база сигналу);

$$R_s = \frac{c * t_s}{2} = 160 \text{ (м)} \quad (3.1.7)$$

Отже сліпа зона радіолокаційної системи дорівнює 160 м.

Використовуючи значення хибної тривоги та ймовірності правильного виявлення цілі, визначені технічним завданням, розрахуємо необхідне мінімальне співвідношення сигнал/шум:

$$q = 2 * \left[\left(\frac{\ln\left(\frac{1}{P_{XT}}\right)}{\ln\left(\frac{1}{P_B}\right)} \right) - 1 \right] = 59.913 \quad (3.1.8)$$

$$q(dB) = 10 * (\log q) = 17.775 \text{ (дБ)} \quad (3.1.9)$$

Визначимо приведенне на вхід приймача співвідношення сигнал/шум, при стисненні ЛЧМ сигналу:

$$q1 = \frac{q}{K} = 1.87 \quad (3.1.10)$$

$$q1(dB) = 10 * (\log q1) = 2.72 \text{ (дБ)} \quad (3.1.11)$$

Розрахуємо час опромінення цілі:

$$T_o = \frac{A}{V_a} = 0.639 \text{ (с)} \quad (3.1.12)$$

Кількість імпульсів за час опромінення нерухомої цілі:

$$N_i = (T_o * F_a) = 1.917 * 10^4 \quad (3.1.13)$$

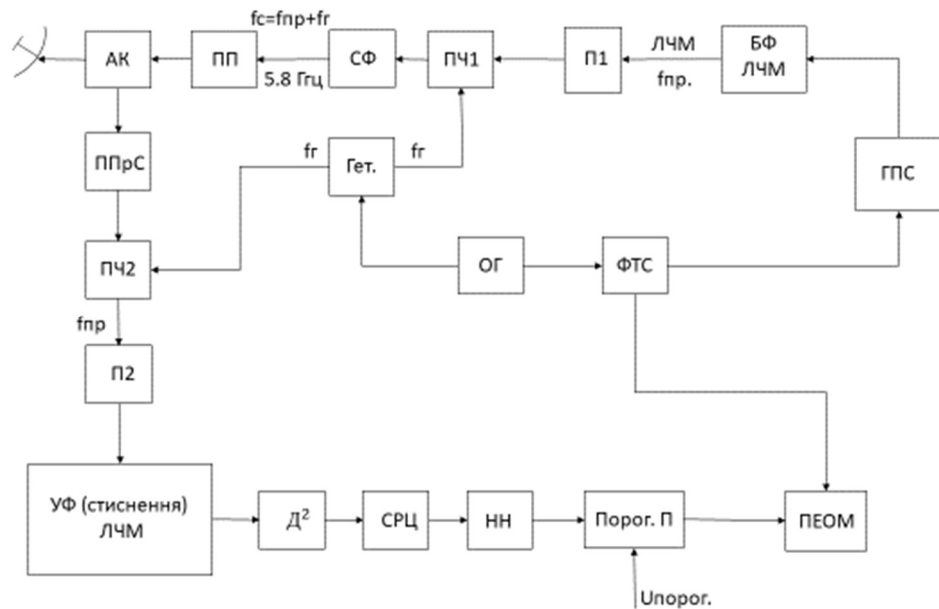


Рис. 3.2.1 – Структурна схема РЛС

У даній РЛС використовується ЛЧМ сигнал, який формується в блоці (БФ ЛЧМ) на основі поданого пилкоподібного сигналу від генератора (ГПС) та генератора частоти, керованого напругою, який знаходиться в блоці БФ ЛЧМ. Сформований зондуєчий сигнал (ЗС) підсилюється в П1 та подається на перетворювач частоти (ПЧ1) на інший вхід якого, поступає сигнал від когерентного гетеродину (Гет.) на частоті f_r . Зондуєчий сигнал на робочій частоті потрапляє через селективний фільтр (СФ) потрапляє на підсилювач потужності (ПП) вихідного каскаду передавача. Підсилений ЗС через антенний комутатор (АК) потрапляє на антенну систему. Відбитий сигнал через антенну систему потрапляє до приймача, де посилюється в (ППрС – пристрій підсилення прийнятого сигналу). В перетворювачі частоти (ПЧ2) за допомогою сигналу від когерентного гетеродину (Гет.), прийнятий сигнал переноситься на проміжну частоту $f_{пр}$, на якій працює узгоджений фільтр для ЛЧМ сигналу (УФ ЛЧМ), в якому відбувається «стиснення» ЛЧМ сигналу і підвищення відношення сигнал/шум на величину коефіцієнта стиснення. Стиснений сигнал проходить через квадратурний детектор (D^2), який виділяє огинаючу стисненого сигналу. Для нейтралізації впливу пасивних перешкод (стовби, дерева, холми і т.д.) на роботу РЛС застосовується система селекції рухомих цілей (СРЦ). Особливості роботи системи СРЦ та її структура описана

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

нижче. Після системи СРЦ, спостерігаються тільки сигнали, які відбиваються від рухомих цілей. Для збільшення відношення сигнал/шум проводиться накопичення відбитого сигналу від радіолокаційної цілі на некогерентному накопичувачі (НН). Ефективність застосування некогерентного накопичення була розрахована в розділі 3.1. Для визначення факту наявності цілі застосовується пороговий пристрій (Порог. П.), який порівнює прийнятий сигнал з рівнем порогу. У разі перевищення порогового рівню, приймається рішення, що ціль виявлено. На персональній електронній обчислювальній машині (ПЕОМ) (мікрокомп'ютер) організуються відображення радіолокаційної інформації у вигляді зручної для споживача.

Для організації синхронної роботи усіх вузлів та елементів РЛС необхідно забезпечити стабільну генерацію тактових сигналів синхронізації. Для цього використовується опорний генератор (ОГ), який формує сигнал з високою стабільністю частоти. Сигнал з опорного генератора (ОГ) подається на формувач тактових сигналів (ФТС), який формує прямокутні імпульси, що синхронізують запуск роботи усіх блоків.

Система селекції рухомих цілей.

Особливу увагу необхідно приділити пристрою селекції рухомих цілей (СРЦ). Основна мета використання РЛС з СРЦ - режекція сигналів пасивних перешкод від нерухомих цілей (будівель, пагорбів, дерев), і виділення сигналів відбитих від рухомих цілей для їх подальшого використання в пристроях виявлення і відображення радіолокаційної обстановки на індикаторі.

Було проведено дослідження декількох методів вибору фільтра, який виступає пристроєм селекції рухомих цілей.

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						32
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Так виглядає канонічна схема рекурсивного цифрового фільтру r -го порядку. [8]

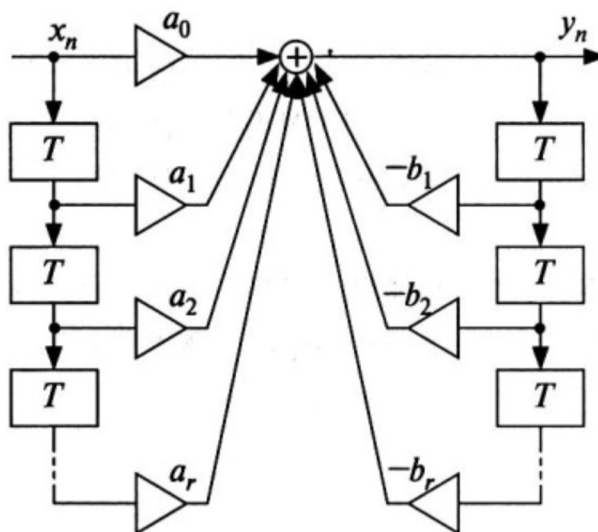


Рис. 3.2.2 – Канонічна схема рекурсивного цифрового фільтру r -го порядку

Амплітудо-частотна характеристика стандартного фільтру черезперіодної компенсації (ЧПК) звичайної системи СРЦ. Недоліком цього АЧХ є те, що частина сигналу від нерухомого об'єкту буде пропускатися на вихід СРЦ і створювати хибні цілі. Це пов'язано з тим, що максимальна режекція сигналу відбувається лише на несучій частоті.

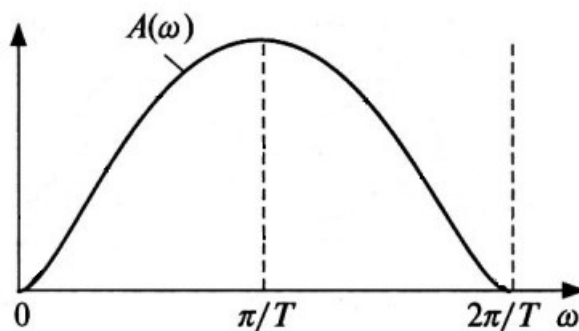


Рис. 3.2.3 – АЧХ фільтру ЧПК

Для якісного придушення пасивних перешкод та виявлення БПЛА, необхідно, щоб АЧХ мало «прямокутний» характер. Тому, для забезпечення необхідної АЧХ фільтру, було проведено порівняння амплітудо-частотних характеристик декількох способів визначення коефіцієнтів цифрового фільтру. А саме методи: Баттерворта, Чебишева 1 та Чебишева 2.

Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата

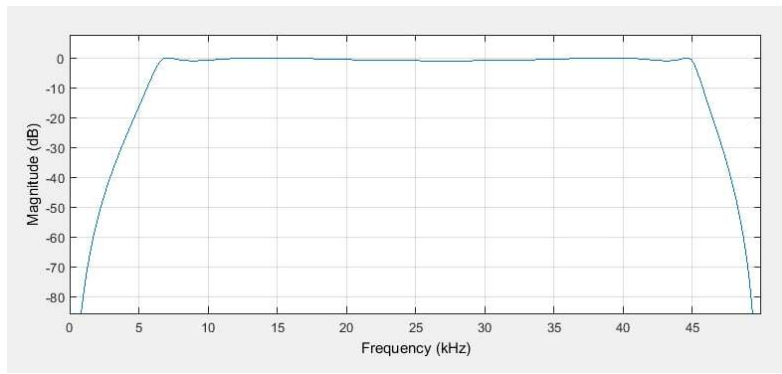


Рис. 3.2.4 – АЧХ фільтра за методом Баттєрворта

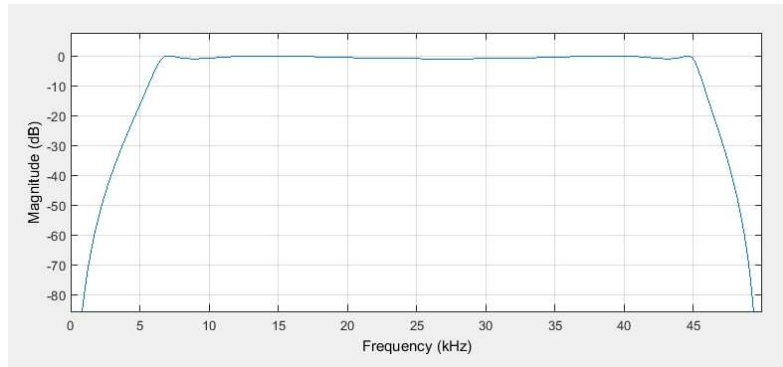


Рис. 3.2.5 – АЧХ фільтра за методом Чебишева 1

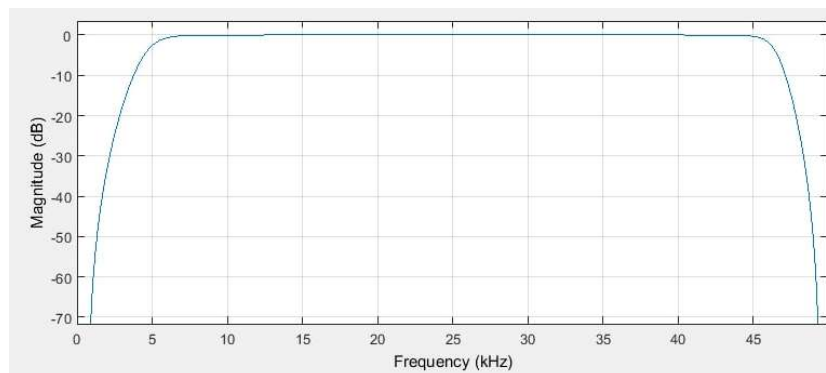


Рис. 3.2.5 – АЧХ фільтра за методом Чебишева 2

Розраховано фільтр 4-го порядку, його коефіцієнти та передавальна функція за методом Чебишева 2.

Numerator	[0.028 0.053 0.071 0.053 0.028]
Denominator	[1.000 -2.026 2.148 -1.159 0.279]

Рис. 3.2.6 – Коефіцієнти фільтра

$$H(z) = \frac{0.028 + 0.053 * z^{-1} + 0.071 * z^{-2} + 0.053 * z^{-3} + 0.028 * z^{-4}}{1 - 2.026 * z^{-1} + 2.148 * z^{-2} - 1.159 * z^{-3} + 0.279 * z^{-4}} \quad (3.2.1)$$

Розглянувши ці методи, можна зробити висновок, що метод визначення коефіцієнтів цифрового фільтра Чебишева 2 є найбільш оптимальним, тому що АЧХ цього фільтра є найбільш приближеною до ідеальної для даної РЛС.

Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата

3.3 Визначення параметрів антенної системи радіолокаційної системи малої дальності

Для розрахунку патч антени, було використано спеціальне програмне забезпечення Patch Antenna 1.2 [17].

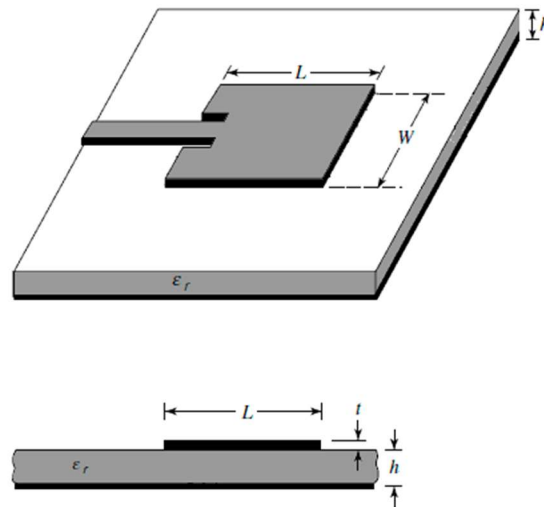


Рис. 3.3.1 – Схема, для розрахунку антени

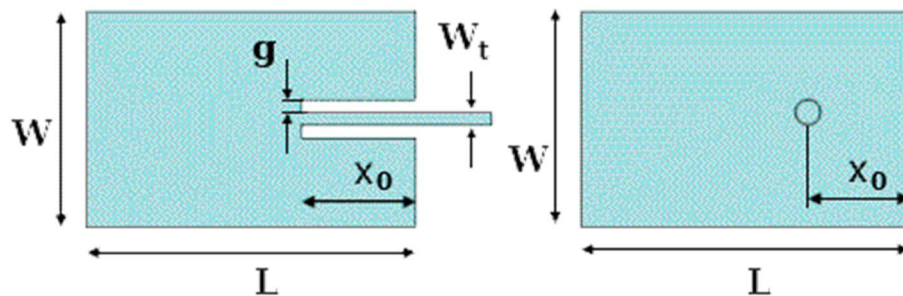


Рис. 3.3.2 – Схема, для розрахунку елемента антени

Довжина хвилі λ : 52 мм;

Розмір патчу W: 20.12 мм;

Розмір патчу L: 16.26 мм;

Мінімальний розмір екрану eL: 33.97 мм;

Мінімальний розмір екрану eW: 38.83 мм;

Вхідний імпеданс патчу Z: 154.54 Ом;

Відстань x_0 для узгодження з 50 Ом: 5 мм;

Ширина проміжку g: 0.56 мм;

Ширина мікросмушкового фідеру W_t : 3.94 мм;

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

35

Далі розрахуємо фазовану антенну решітку в середовищі MATLAB.

Будуємо прямокутну антенну решітку розміром 4x8. Відстань між елементами 0.026 м. Частота 5.8 ГГц.

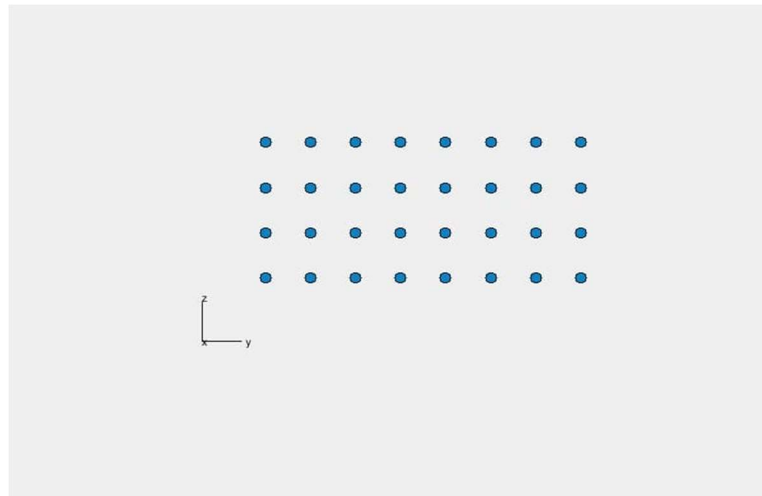


Рис. 3.3.3 – Прямокутна ФАР

На рисунках нижче зображені діаграми направленості ФАР в азимутальній та полярній системах координат.

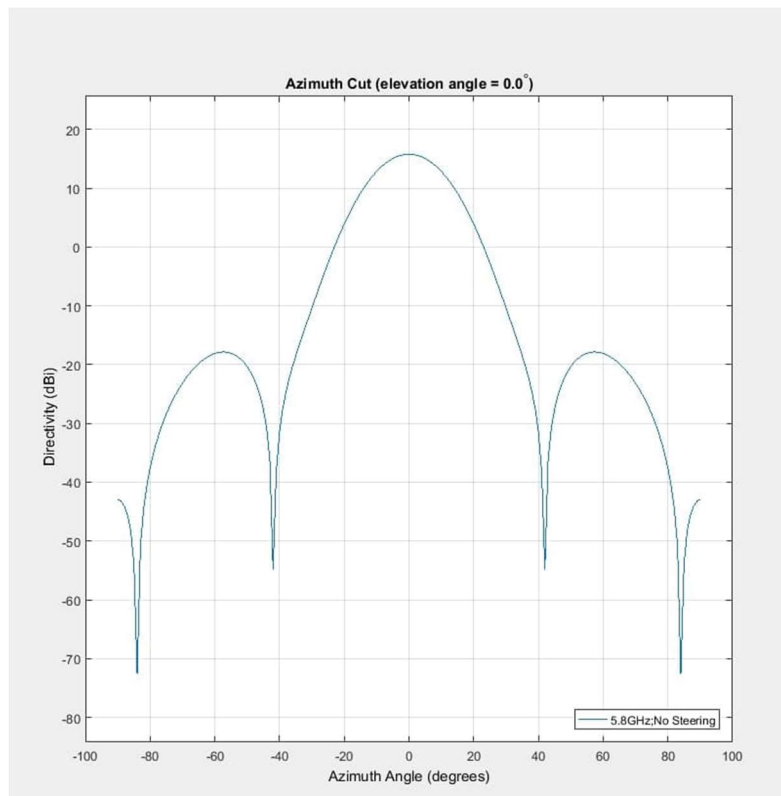


Рис. 3.3.4 – Діаграма направленості ФАР в лінійній системі координат в Е площині

Ширина діаграми спрямованості в азимутальній площині по рівню -3 дБ складає 16 градусів.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

36

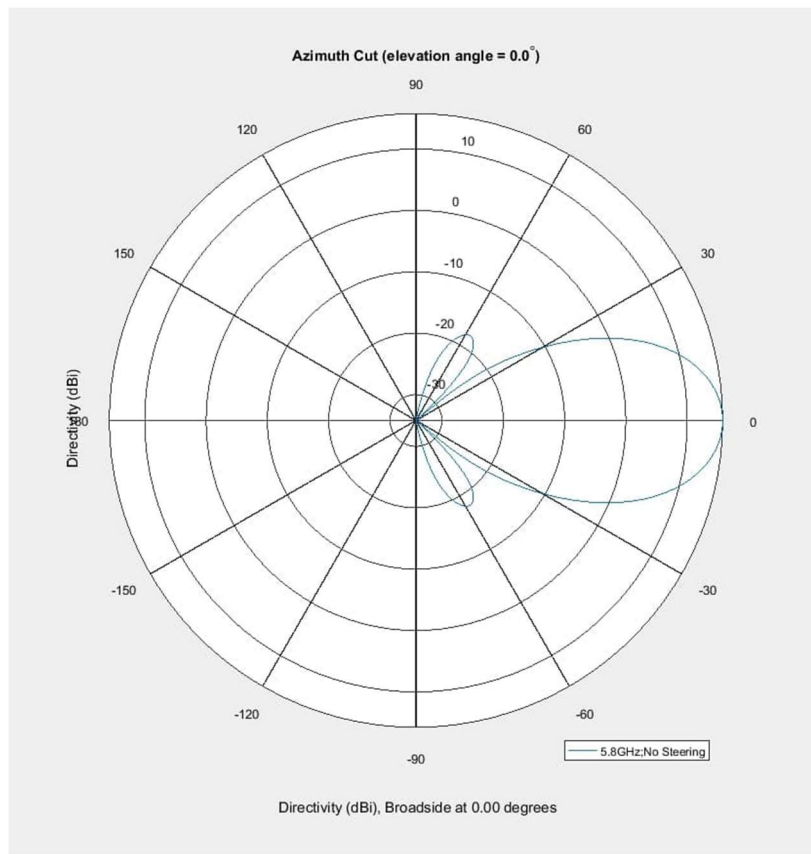


Рис. 3.3.5 – Діаграма направленості ФАР в полярній системі координат в Е площині

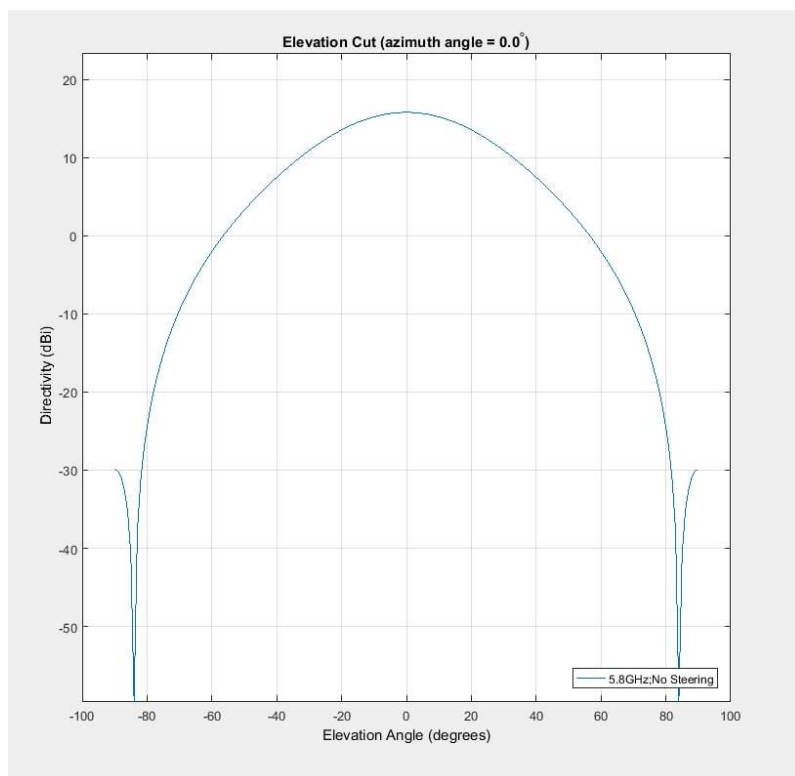


Рис. 3.3.6 – Діаграма направленості ФАР в лінійній системі координат в Н площині

Ширина діаграми спрямованості у вертикальній площині по рівню -3 дБ складає 44 градуси.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

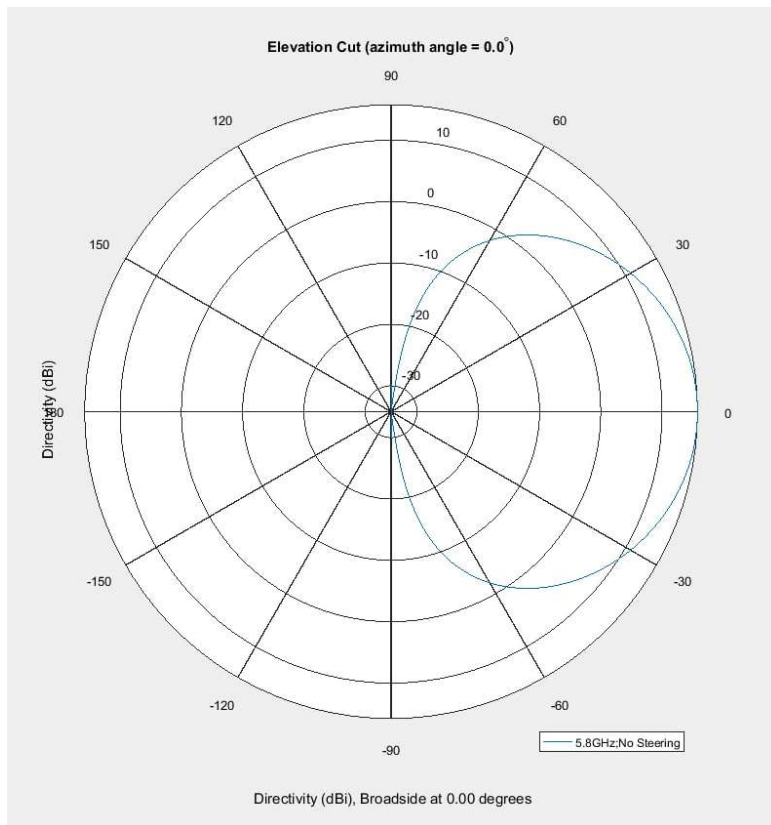


Рис. 3.3.7 – Діаграма направленості ФАР в полярній системі координат в Н площині

На рисунках нижче зображено діаграми направленості в 3D вигляді, а також макет розрахованої антени.

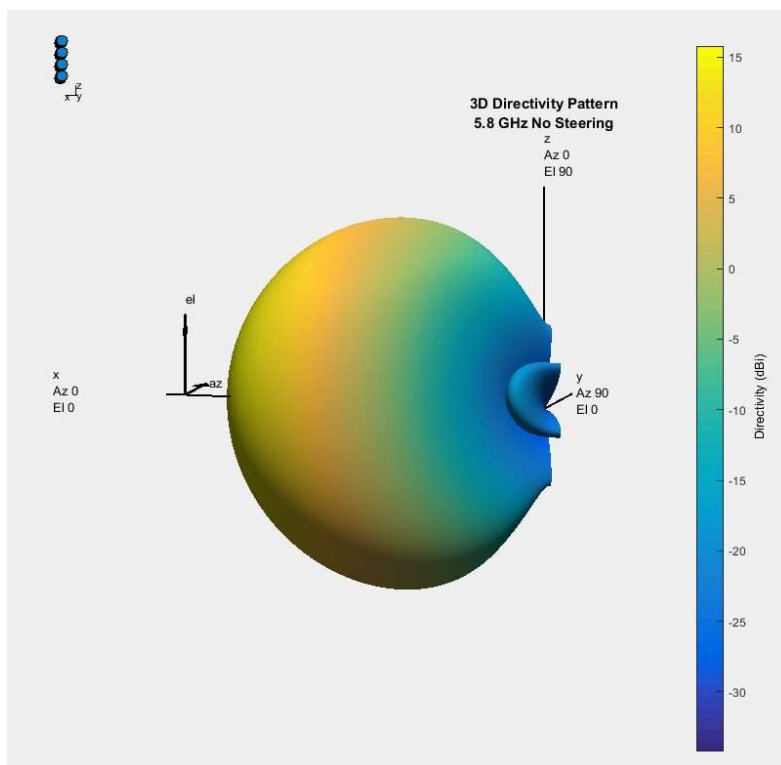


Рис. 3.3.8 – Діаграма направленості ФАР в 3D вигляді (вид збоку)

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

38

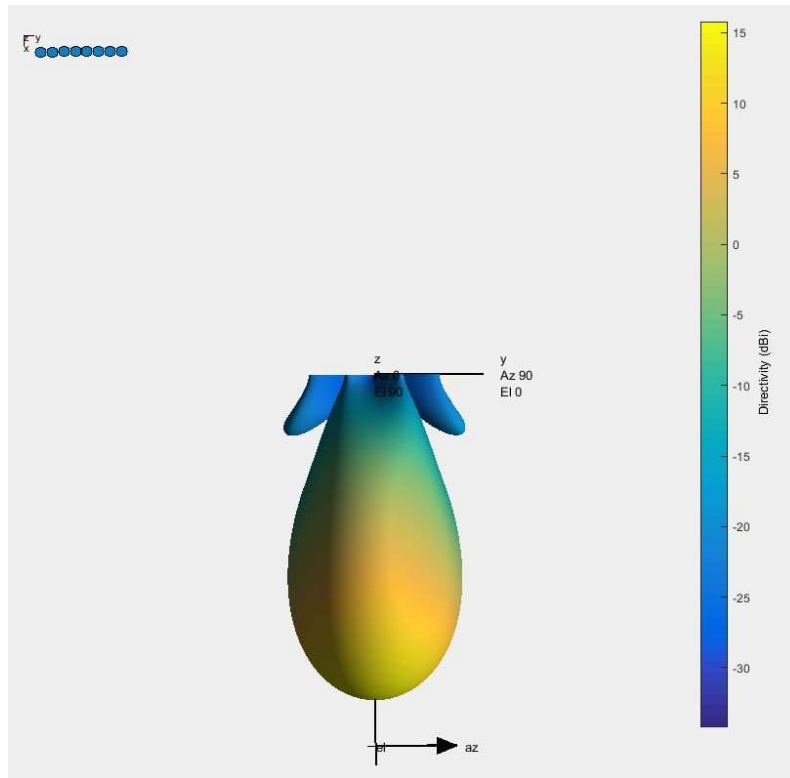


Рис. 3.3.8 – Діаграма направленості ФАР в 3D вигляді (вид зверху)

У відповідності до проведених розрахунків, був створений дослідний зразок фазованої антенної решітки розмірів 4x8, елементами якої, є патч антени. Робоча частота антенної системи – 5.8 ГГц. Дослідний зразок представлений на рисунку 3.3.9.

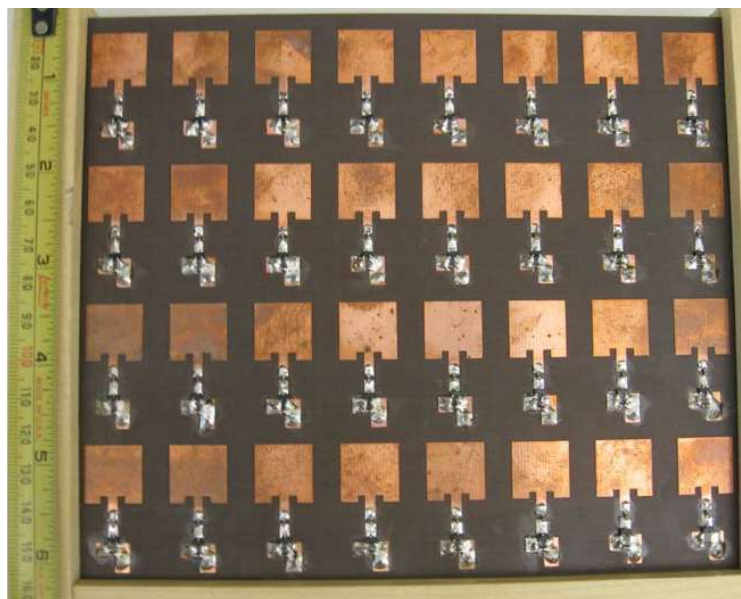


Рис. 3.3.9 – Дослідний зразок ФАР розміром 4x8

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист
39

3.4 Підсистема формування зондуючого сигналу

При проектуванні підсистеми формування зондуючого сигналу, необхідно врахувати всі фактори для забезпечення високої надійності, технологічності та низької собівартості.

Маса і габарити повинні бути мінімальними, щоб забезпечити найбільшу зручність експлуатації.

Живлення забезпечується напряму від напруги 15 В.

Оскільки пристрій призначений для роботи в критому приміщенні, в ньому не передбачений захист від потрапляння вологи.

Прилад не має рухомих та складних частин, окрім трьох роз'ємів, тому є стійким до незначних механічних пошкоджень. Також для транспортування апаратуру достатньо загорнути в бульбашко-повітряну плівку і помістити в картонну коробку.

Пристрій складається з друкованої плати з елементами, коробки з трьома коаксіальними роз'ємами для під'єднання «загальний», «вхід» та «вихід», на задній частині 2 клемника, а також 4 гвинта.

Схема формувача прямокутних імпульсів зображена на Рис. 3.4.1.

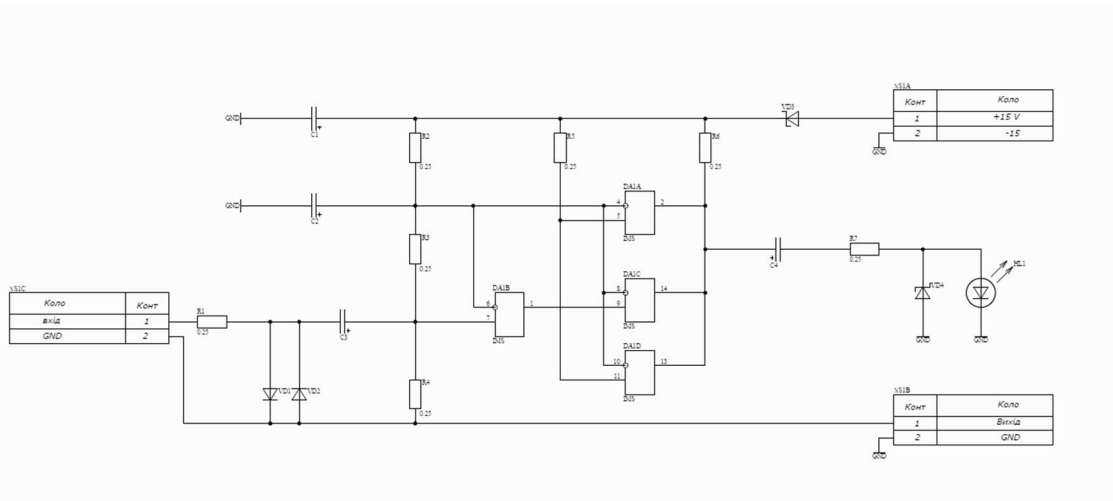


Рис. 3.4.1 – Схема електрична принципова

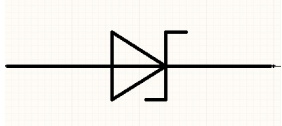
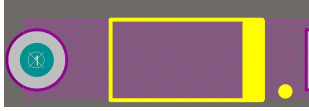
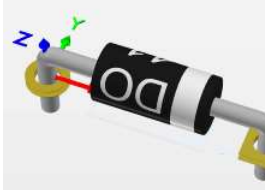
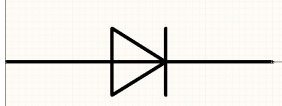
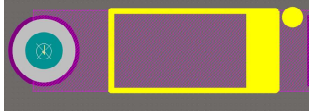
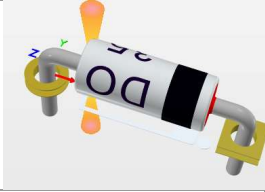
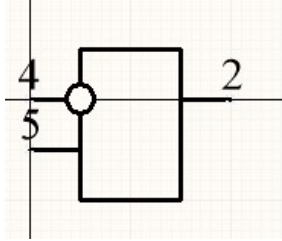
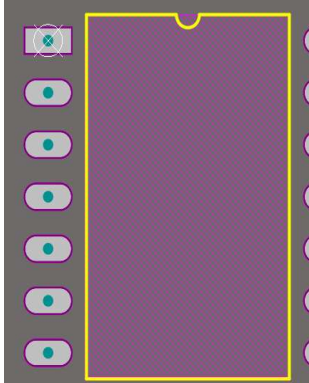
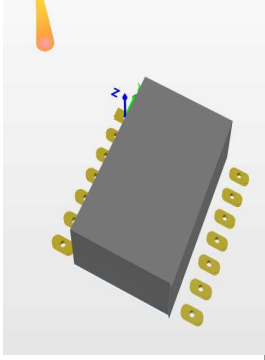
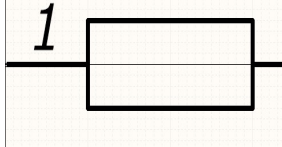
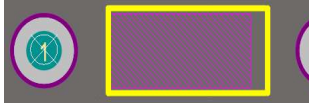
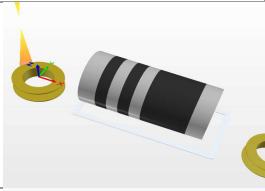
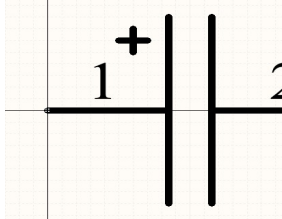
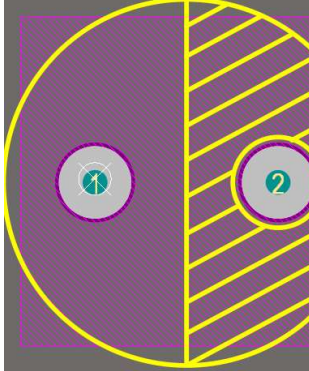


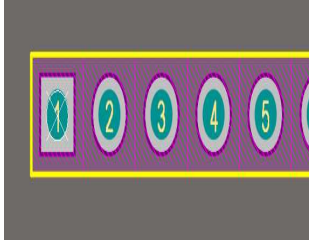
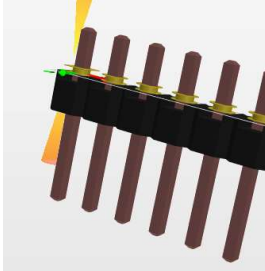
Вихідний сигнал генератора надходить на гніздо XS1. Діоди VD1, VD2 разом із резистором R1 захищають компаратор DA1.1 від надмірної вхідної напруги.

Резисторний подільник R2-R4 задає поріг переключення цього компаратора, а також його чутливість. Із підвищенням напруги живлення його чутливість погіршується. Вихідний сигнал компаратора DA1/1 поступає на вихідний каскад, який в свою чергу зібраний на компараторах DA1.2 – DA1.4 підключенні паралельно і працюючи на один навантажений резистор R6. Діод VD3 захищає елементи приставки від неправильної полярності напруги живлення. Конденсатори C1 та C2 – блокуючі, C3 – розділовий. Напруга живлення $\pm 15\text{В}$. Струм максимальний – 2.5 А. До роз'єму XS1 підключаються 3 виводи: напруга живлення $\pm 15\text{В}$, вихід GND та загальний вивід GND. В якості роз'єму використовується PLD роз'єм на 6 пінів.

					<i>PT71.464532.001 ПЗ</i>	Лист
						41
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Бібліотека компонентів

Таблиця 3.4.1 – Перелік елементів

Ком-пон.	Схематичне по-значення	2D footprint	3D footprint								
VD3											
VD1,V D2											
DA1											
R1-R6											
C1-C3											
XS	<table border="1" style="font-size: small;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">XS.2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Конт</td> <td style="text-align: center;">Коло</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">Вихід</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">GND</td> </tr> </table> 	XS.2		Конт	Коло	1	Вихід	2	GND		
XS.2											
Конт	Коло										
1	Вихід										
2	GND										

Зм	Лист	№ докум	Підпис Дата

PT71.464532.001 ПЗ

ПЛОЩА ПЛАТИ, РОЗРАХУНКИ

Площі так кількість елементів представлені в таблиці 3.4.2.

Таблиця 3.4.2 – площа елементів

Назва	Кількість	Складність	Площа мм ²
Діод (варикап)	2	1	36.092
Електролітичний конденсатор	4	1	412.092
Діоди	2	1	74.716
Резистори	6	1	108.276
Мікросхема	1	3	149.34
Роз'єм	1	3	41.399

Таким чином сумарна площа, яку займають елементи складає 2074 мм²

Визначемо площу, що необхідна для розміщення елементів кріплення, які закріплюють плату. Плата фіксується на чотирьох стійках . Приймаємо, що під одну стійку виділяється площина $S_{CT} = 20\text{мм}^2$

$$S_K = S_{CT} * N \quad (3.4.1)$$

$$S_K = 20 * 4 = 80 \text{ мм}^2 \quad (3.4.2)$$

Визначаємо загальну площу плати:

$$S_{заг} = S_{пов} + S_K \quad (3.4.3)$$

$$S_{заг} = 2074 + 80 = 2154 \text{ мм}^2 \quad (3.4.4)$$

Мінімальна площа плати складає 2154 мм².

Розрахунок параметрів друкованого монтажу

Для своєї плати обираю 2 клас точності
 Діаметри монтажних та перехідних отворів необхідні для виготовлення даної друкованої плати згідно ОСТ4.070.010-78 приведені в таблиці 3.4.3.

Таблиця 3.4.3 – рекомендовані діаметри отворів

Діаметр, мм		Діаметр контактного майданчика	Мінімальна відстань між центрами отворів
виводу ЕРЕ	отвору	мм	мм
0.6;0.7	1.1	3.0	3.5
0.8;0.9	1.3	3.0	3.75
1.0;1.1	1.5	3.0	3.75

- діаметри контактних майданчиків доцільно вибирати з ряду рекомендованих за ГОСТ 10317-79. Для кожного контактного майданчика перевіряється виконання умови

$$D \geq D_{\min},$$

де D_{\min} - найменший номінальний діаметр контактного майданчика.

$$D_{\min} = (d_o + \Delta d_{в.о.}) + 2b + \Delta t_{в.о.} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{н.о.}^2)^{1/2} \quad (3.4.5)$$

$$D_{\min 1} = (1.1 + 0.05) + 2 * 0.2 + 0.15 + (0.15^2 + 0.25^2 + 0.15^2)^{1/2} = 2.4 \text{ [мм]} \quad (3.4.6)$$

$$D_{\min 2} = (1.3 + 0.1) + 2 * 0.2 + 0.15 + (0.15^2 + 0.25^2 + 0.15^2)^{1/2} = 2.64 \text{ [мм]} \quad (3.4.7)$$

$$D_{\min 3} = (1.5 + 0.1) + 2 * 0.2 + 0.15 + (0.15^2 + 0.25^2 + 0.15^2)^{1/2} = 2.84 \text{ [мм]} \quad (3.4.8)$$

- діаметри контактних майданчиків вибираються

$$D_1 = 2.8 \text{ мм}, D_2 = D_3 = 3 \text{ мм};$$

- конструктивно-технологічний розрахунок ширини t_1 друкованих провідників.

Плата двостороння.

Тип встановлення елементів на плату: клас С - змішаний: монтовані в отвори і поверхнево монтовані компоненти.

Технологія виробництва плати: комбінований позитивний метод

Вихідний матеріал: діелектрична основа ламінована з двох сторін мідною фольгою. У позитивному комбінованому методі виготовлення друкованих плат травлення малюнка відбувається після металізації отворів, а для з'єднання металізуюча отворів з катодом використовується ще не витравлена фольга, спочатку присутня на поверхні заготовки.

ТРАСУВАННЯ ПЛАТИ

А) Вид зверху приведено на рисунку 3.4.2.

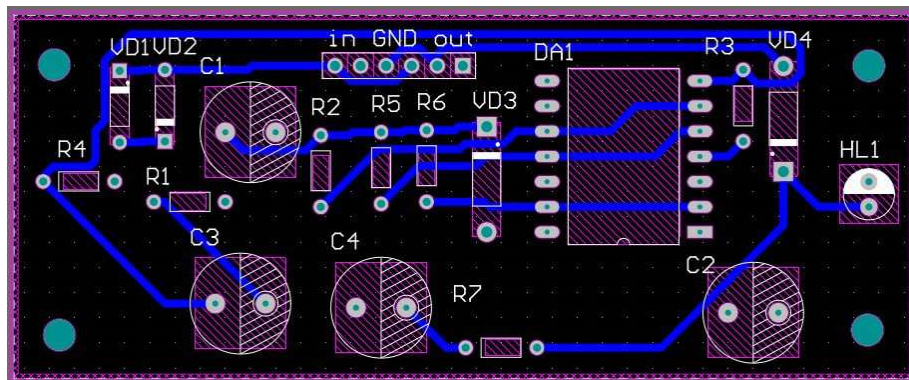


Рис. 3.4.2 – друкована плата (вид зверху)

Б) Вид знизу приведено на рисунку 3.4.3.

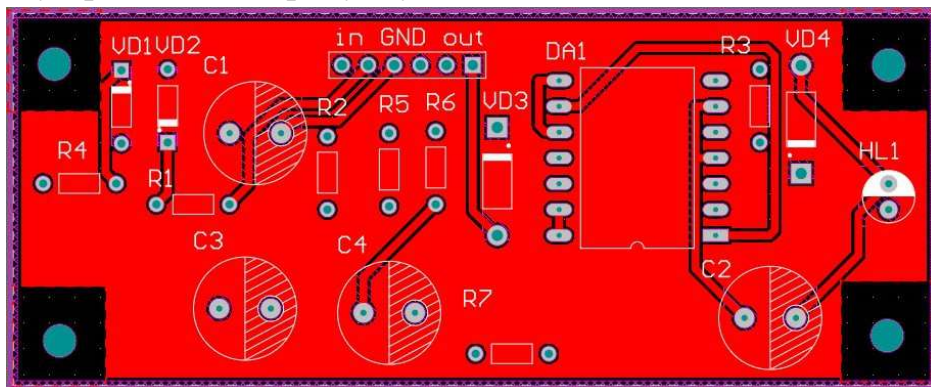


Рис. 3.4.3 – друкована плата (вид знизу)

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

45

Розрахунок вібростійкості:

Вхідними даними для розрахунків є довжина ширина та товщина плати:

- Довжина $a = 89$ мм
- Ширина $b = 36$ мм
- Товщина $h = 22$ мм
- Модуль пружності для плати $E = 3.02 * 10^{10}$ Нм²
- Густина $\rho = 2.05 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 1.90 * 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- Маса встановлених елементів $M = 0.010$ кг

Розрахунок:

1. Приведена маса друкованої плати $m_b = \rho * h = 4.51 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$ (3.4.9)

2. Приведена маса плати деталями :

$$m_{be} = m_b + \frac{M}{a * b} = 7.614 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \quad (3.4.10)$$

3. Циліндрична жорсткість (характеризує здатність пластини до де-

формації) $D = \frac{E * h^3}{12(1 - \xi^2)} = 28.16$ Нм (3.4.11)

4. Коефіцієнт відношення сторін $\beta = \frac{a}{b} = 2.486$ (3.4.12)

5. Значення функції

$$\varphi(\beta) = \pi^2 \sqrt{\frac{1 + 1.621 \frac{\xi}{\beta} + \frac{1}{\beta^2}}{1 + 1.621 \frac{\xi}{\beta^3} + \frac{1}{\beta^6}}} = 11.124 \quad (3.4.13)$$

6. Резонансна частота

$$f_0 = \frac{\varphi(\beta)}{2\pi a^2} * \sqrt{\frac{D}{m}} = 425.072 \text{ Гц} \quad (3.4.14)$$

Дана друкована плата призначається для роботи в стаціонарних умовах, без регулярних вібраційних навантажень. Однак при транспортуванні на прилад будуть впливати зовнішні вібрації. Ми визначили, що резонансна частота плати перевищує максимальну частоту вібраційних впливів 60 Гц, що є задовільним результатом.

Розрахунок надійності друкованого вузла

У випадку відмови прилад підлягає відновленню, після чого пристрій знову може бути використане по призначенню. Таким чином, пристрій відновиться до відновлюваного РЕА. Тривалість ділянки припрацювання складає десятки - сотні годин, а тривалість робочої ділянки сотні тисяч годин, то розрахунок проводиться для робочої ділянки. На робочій ділянці $\lambda_0(t) = \text{const}$ і справедливий експонентний закон $P(t) = e^{(-k \cdot \lambda_0 \cdot t)}$

Так як з позиції безвідмовності блок досить складний, то на даній ділянці також справедливе співвідношення.

$$\lambda_0 = \sum_{i=0}^n \lambda_i; \quad (3.4.15)$$

λ_0 – параметр потоку відмовлень системи;

λ_i – параметр потоку відмовлень i -го елемента системи;

k – поправочний коефіцієнт, що враховує умови експлуатації.

На робочій ділянці середнє напрацювання на відмову при експонентному законі за формулою

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_0}; \quad (3.4.16)$$

Розрахунок надійності по раптових відмовленнях виконується для найбільш несприятливих факторів, а саме:

– максимальних значеннях навколишньої температури;

– максимальних внутрішніх перегрівів елементів;

– максимальної вологості. Параметр потоку відмовлень i -го елемента визначається за формулою

$$\lambda_i = \lambda_{0i} * a_1 * a_2; \quad (3.4.17)$$

де λ_{0i} – параметр потоку відмовлень i -го елемента в нормальних умовах (відповідно до нормативно-технічної документації);

a_1, a_2 – коефіцієнти, що враховують вплив температури та коефіцієнта завантаження K_n і вологості відповідно.

$$a_1 = K_1 * K_2; \quad (3.4.18)$$

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						47
Зм	Лис	№ док	Підпис	Дата		

$$a_1 = 1,07 * 2,5 = 2,675; \quad (3.4.19)$$

K_1, K_2 – поправочні коефіцієнти.

Для імовірності відновлення як функції від часу справедливий експоненційний закон, тому що з погляду ремонтпридатності дана схема є відносно простою.

$$P_B(1) = 1 - e^{\left(-\frac{1}{T_B}\right)}; \quad (3.4.20)$$

де $P_B(1)$ – імовірність того, що фактична тривалість робіт з відновлення працездатності виробу не перевищить заданої.

Напрацювання до можливої першої відмови (γ) – це час, на протязі якого ймовірність безвідмовної роботи буде не нижчою наперед заданого рівня гарантійної ймовірності згідно ТЗ 0,9, визначається за формулою

$$T_{min} \approx T_{сер}(1 - \gamma); \quad (3.4.21)$$

Середній час відновлення блоку, формула

$$T_{B1} = \frac{\sum_{j=1}^m (\lambda_j * T_{Bj})}{\sum_{j=1}^m \lambda_j}; \quad (3.4.22)$$

Прийняті припущення дозволяють використовувати теорему множення вірогідності, яка після групування рівнонадійних елементів виглядає таким чином:

Розбиваємо елементи на рівнонадійні групи.

Результати розрахунків занесено в таблицю 3.4.4.

ОГЛЯД ГОТОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

На рисунках 3.4.4 – 3.4.5 зображена загальна модель приладу.

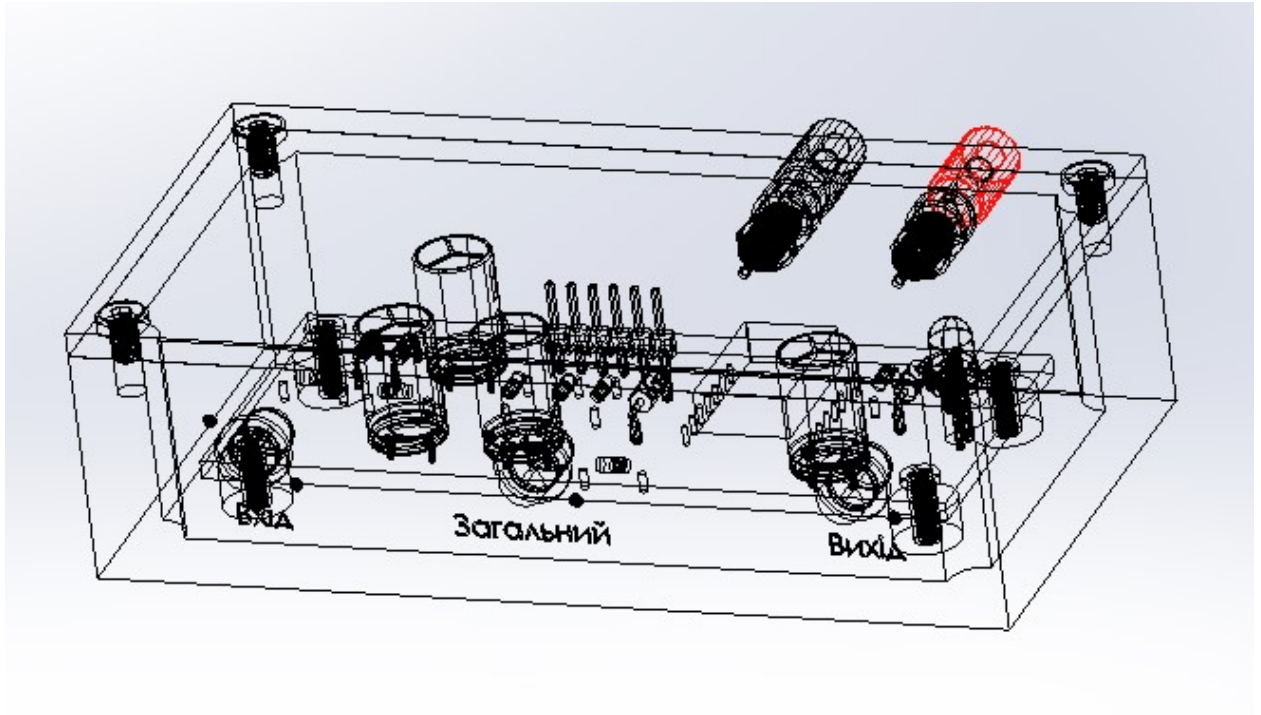


Рис. 3.4.4 – Модель приладу

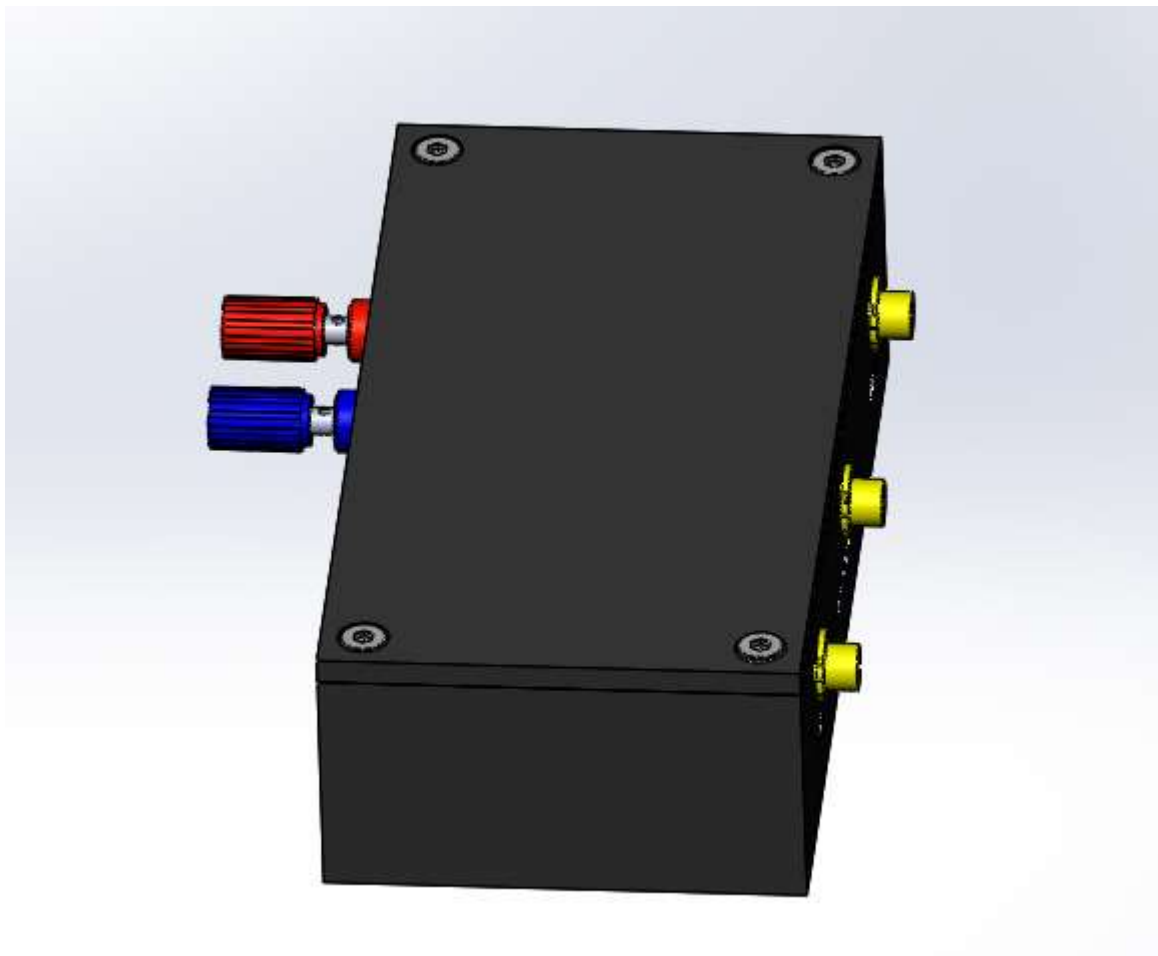


Рис. 3.4.5 – Модель приладу (вид зверху)

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

50

ВИСНОВКИ:

У дипломному проєкті було досліджено сучасні підходи до побудови радіолокаційних систем малої дальності. Під час дослідження було визначено, що в таких типах РЛС доцільно застосовувати широкополосний радіосигнал з великою базою ($B \gg 1$), та доцільно застосовувати високу частоту повторення випромінювання зондуючих імпульсів, щоб підвищити відношення сигнал/шум, а відповідно підвищити ймовірність виявлення малорозмірних цілей.

Проведено порівняльний аналіз радіолокаційних сигналів. За результатами аналізу було прийнято рішення застосувати ЛЧМ сигнал, з великим коефіцієнтом стиснення ($K = 32$). Параметри сигналу забезпечують роздільну здатність РЛС по дальності між двома близько розташованими цілями – 5 м.

Розглянуто особливості безпілотних літальних апаратів як різновид радіолокаційних цілей. Основною особливістю БПЛА є мала ЕПР цілі близько 0.01 м^2 , та спроможність літати на малих висотах та швидкостях.

Виконано розробку структурної схеми РЛС кругового обзору малої дальності, робочою частотою зондуючого сигналу визначено 5.8 ГГц, розраховані основні тактичні та технічні характеристики РЛС, параметри антенної системи.

Особливу увагу приділено детальній розробці декількох блоків структурної схеми, а саме: системі селекції рухомих цілей (СРЦ) та підсистемі формування тактових прямокутних імпульсів. Вибрано оптимальний метод визначення коефіцієнтів цифрового фільтру системи СРЦ, та створено антенну систему у вигляді ФАР з коефіцієнтом підсилення 16 дБ.

За сукупністю отриманих результатів, можна вважати, що дипломний проєкт виконаний в повному обсязі, а мета роботи досягнута.

					<i>PT71.464532.001 ПЗ</i>	Лист
						51
Зм	Лис	№ док	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Бакулев П. А. Радиолокационные системы / П. А. Бакулев. – Москва, 2004. – 321 с. – (Радиотехника).
2. Тяпкин В. Н. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск / В. Н. Тяпкин, А. Н. Фомин, Е. Н. Гагарин. – Красноярск: 2-е изд., 2016. – 536 с. – (ISBN; 978).
3. Михайлов В. Н. Разработка радиолокационной станции со сложным сигналом / В. Н. Михайлов, А. А. Коновалов., 2013. – 33 с.
4. Филин Е. Д., Киричек Р. В. Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Том 6. № 2. С. 87–93.
5. Проектирование радиолокационных систем [Электронный ресурс]: монография / Д. М. Пиза, Д. С. Семенов, Т. И. Бугрова; под. общ. ред. Д. М. Пизы. – Электрон. дані. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017.
6. Горбунов Ю. Н., Лобанов Б. С., Куликов Г.В. Введение в стохастическую радиолокацию. Учебное пособие для вузов – М: Горячая линия – Телеком, 2015. – 376 с.
7. Ч. Кук, М. Б. Бернфельд. Радиолокационные сигналы. Пер. с английского под ред. В.С. Кельзона. М. Изд-во «Советское радио», 1971, -568 с.
8. Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М. Изд-во «Советское радио», 1970, - 584 с.
9. Айфичер, Эммануил С., Джервис, Барри У. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004, - 992 с.
10. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. посібник/ За ред. Ю. Л. Мазора, Є. А. Мачуського, В. І. Правди – К.: Вища шк., 1999, - 838 с.
11. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов в зеркале MATLAB: учеб. Пособие. – СПб.: БХВ – Петербург, 2018, - 560 с.

					<i>РТ71.464532.001 ПЗ</i>	Лист
						52
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата		

12. Современная радиолокация (анализ, расчет и проектирование систем). Пер. с англ. под ред. Кобзарева Ю. Б. Изд-во «Советское радио», 1969, ц. 3 р. 23 к.

13. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991, - 608 с.

14. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Ширман Я. Д. Лосев Ю. И., Минервин Н. Н., Москветин С.В., Горшков С.А., Леховицкий Д. И, Левченко Л. С./ Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998, - 828 с.

15. Шокало В. М., Правда В. І., Усін В. А., Вунтесмері В.С., Грецьких Д. В., Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч1. Основи теорії електромагнітного поля: Підручник для студентів ВНЗ/ За заг. ред. В. М. Шокало та В. І. Правди. Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2009, - 286 с.

16. Шокало В. М., Правда В. І., Усін В. А., Вунтесмері В.С., Грецьких Д. В., Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль: Підручник для студентів ВНЗ. Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2010, - 435 с.

17. Расчет патч антенны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3g-aerial.biz/onlajn-raschety/raschety-antenn/raschet-patch-antenny>