

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 охорони периметру»

Виконала:

студентка IV курсу, групи РТ-71

Рясик Анна Ігорівна

Керівник:

доц. каф. РТПС, к.т.н., доцент

Чмельов В'ячеслав Орійович

Рецензент:

доц. каф. РОС, к.т.н., доцент

Лашевська Наталія Олександрівна

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

Студентка

Київ – 2021 року



REDMI NOTE 8T
AI QUAD CAMERA

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проєкту

на тему: «Радіолокаційна система охорони периметру»

Київ 2021 року

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект містить поняття та особливості роботи радіолокаційних систем, їх класифікацію та структуру. Також включає в себе розробку сучасної РЛС малої дальності для охорони периметру.

Метою цього проекту є розробка основних технічних параметрів РЛС охорони периметру.

Для досягнення мети проекту було розглянуто формування зондуючого сигналу та діаграми спрямованості антени РЛС, розроблено структурну схему РЛС та синтезатора частоти, а також створено передавач з частотою 4 ГГц.

Ключові слова: РЛС, зондуючий сигнал, охорона периметру.

ANNOTATION

The diploma project lays out theoretical foundations of radio-location systems functioning, along with their classification and structuring.

It also includes developing a modern short radius radar for enforcing security upon a certain restricted area.

To achieve all of the aforementioned tasks this project contains studies on probing signal formation methods, along with directional diagrams for the radar's antenna. It also contains structural schemes describing the radar itself and its frequency synthesizer, which served as a basis for designing a transmitter that operates on frequency of 4GHz.

Keywords: radar, radio location system, probing signal, security.

ЗМІСТ

Анотація	3
Annotation	4
Перелік скорочень	2
Вступ.....	3
1 ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ СУЧАСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ.....	5
1.1 Класифікація радіолокаційних станцій за завданням та функціями	5
1.2 Типова структура радіолокаційної станції з імпульсним та неперервним зондуючим сигналом	9
1.3 Порівняння зондуючих сигналів радіолокаційної системи.....	13
2 ПІДХОДИ ДО РОЗРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ МАЛОЇ ДАЛЬНОСТІ.....	19
2.1 Формування зондуючого сигналу для радіолокаційної станції малої дальності.....	19
2.2 Формування діаграми спрямованості антенної системи радіолокаційної станції охорони периметру.....	20
2.3 Розробка конфігурації багатопозиційного радіолокаційного комплексу охорони периметру з складною геометрією.....	23
3 Розробка РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ОХОРОНИ ПЕРИМЕТРУ	28
3.1 Узагальнена структурна схема радіолокаційної системи охорони периметру	28
3.2 Визначення основних параметрів радіолокаційної системи	30
3.3 Передавач радіолокаційної системи охорони периметру	32
3.3.1 Вихідний каскад радіопередавача – підсилювач потужності зондуючого радіолокаційного сигналу.....	35
3.4 Підсистема стабілізації напруги в блоці живлення радіолокаційної системи охорони периметру	37
Висновки	45
Перелік джерел посилань	46
Додаток А.....	48

					РТ71.464532.001 ПЗ			
ЗМ	Лист	№ докум	Підпис	Дата	РЛС охорони периметру	Літ	Лист	Листів
Розроб-	Рячик Д І						1	
Переві-	Чмельов							
Ч Контр	П І Б					РТ-71 РТФ		
Затвер-	П І Б							

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

РЛС — Радіолокаційна система
ППО — Протиповітряна оборона
ЗС — Зондуючий сигнал
АКФ — Автокореляційна функція
ЛЧМ — Лінійно частотно-модульований
ДС — Діаграма спрямованості
КСХ — Коефіцієнт стоячої хвилі
ПЧ — Перетворювач частоти
СЧ — Синтезатор частоти
АПЧ — Автоматичне підстроювання частоти
БПЛА — Безпілотний літальний апарат
ФАПЧ — Фазова автопідстройка частоти

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						2
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Більшість індустріальних об'єктів, які є потенційно небезпечними, такі як, атомні електростанції, режимно-секретні підприємства, паливно-енергетичні об'єкти, а також підприємства з небезпечним виробництвом, несуть велику техногенну загрозу. Тому потрібно забезпечити безпеку таких об'єктів спеціального призначення.

У зв'язку з розвитком безпілотних літальних апаратів з'явилась нова загроза – атака з повітря такими апаратами, які можуть здійснювати несанкціонований моніторинг об'єктів.

Крім цього, в світі збільшились терористичні атаки на режимно-секретні об'єкти. Стала нагальна потреба забезпечити охорону зазначених об'єктів при різних умовах (у нічний час, при погіршених погодних умовах), коли засоби візуального контролю не спроможні здійснювати постійне спостереження. Тому для організації захисту таких об'єктів пропонується застосовувати радіолокаційні системи, які формують неперервну зону контролю вздовж охоронного периметру.

Отже, об'єкт дослідження: розробка радіолокаційної системи моніторингу та виявлення факту перетинання периметру зони охорони.

Предмет дослідження: радіолокаційна система малої дальності з контролем перетинання вектору спостереження.

Мета проекту: розробка основних технічних параметрів радіолокаційної системи контролю периметру.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати ряд часткових завдань:

1. Розглянути основні підходи до побудови сучасних радіолокаційних систем.
2. Проаналізувати досвід роботи радіолокаційної станції малої дальності.
3. Дослідити особливості застосування спеціальних радіолокаційних сигналів та структурних схем радіолокаційних систем охорони периметру.

4. Розробити структурну та функціональні схеми основних вузлів радіолокаційної системи.

5. Визначити параметри вузлів та підсистем радіолокаційної системи у відповідності до технічного завдання.

Під час виконання роботи використовувались методи теорії кіл, оптимальної фільтрації, спектрального аналізу, системного аналізу, електродинаміки та поширення радіохвиль.

У дипломному проекті розроблена структурна схема РЛС, антенна система, підсистема формування зондуючого сигналу та електрична принципова схема стабілізатора живлення РЛС.

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						4
Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

1 ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ СУЧАСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

1.1 Класифікація радіолокаційних станцій за завданням та функціями

Радіолокація використовується у багатьох сферах пов'язаних з виявленням повітряних та наземних об'єктів та цілей, визначенням їх просторових координат, параметрів руху та швидкості, навігацією як повітряних, так і морських суден, керуванням повітряним та морським рухом, наведенням засобів протиповітряної оборони (ППО), забезпеченням безпеки руху транспортних засобів, прогнозуванням погодних умов. Крім цього, базуючись на принципах радіолокації, вирішуються задачі, пов'язані з діагностикою організму людини

Радіолокаційна станція (РЛС) – це сукупність різних пристроїв, які можуть здійснювати спостереження за об'єктами на землі, в повітрі або в воді. Розглянемо основні задачі, для вирішення яких використовуються радіолокаційні системи:

1. Пошукові радіолокаційні станції.

Задачею таких станцій є сканування простору імпульсами коротких радіохвиль. Основним принципом роботи такої станції є те, що більшість об'єктів, які входять в цілі пошуку здатні відбивати радіохвилі. Таким чином, радіолокаційна станція здатна визначити відстань та інші параметри цілі, наприклад швидкість.

До пошукових радіолокаційних станцій відносяться:

- Станції раннього попередження

Станції раннього попередження в основному використовуються в оборонних цілях та мають виявляти загрози на якомога більшій відстані. Такі станції зазвичай працюють на низьких частотах, випромінюють хвилі великої довжини та не здатні точно встановити позицію цілі, на відміну від інших типів радіолокаційних станцій [13].

- Радіолокаційні станції ППО

Такі станції мають цілком військове застосування та використовуються для виявлення, супроводження та контролю повітряних цілей, з подальшою передачею інформації до командного центру, в якому визначається найбільш оптимальна стратегія боротьби з загрозою. Такі станції за призначенням схожі на станції раннього виявлення, але вони є більш компактні та можуть розташовуватись як на землі, так і мати повітряне базування [13].

- Загоризонтні радіолокаційні станції

Загоризонтні станції призначені для виявлення цілей на дуже великих відстанях, які знаходяться за радіолокаційним горизонтом, що є границею видимості за дальністю для звичайної радіолокаційної станції. Такі станції можуть виявляти цілі на відстанях від сотень до тисяч кілометрів. Зазвичай такі системи будуються з використанням короткохвильових імпульсів, які відбиваються іоносферою Землі та повертаються на поверхню, таким чином відбиваються та повертаються до радіолокаційної станції. Іншим варіантом реалізації такої системи є використання поверхневих хвиль, які використовують низькочастотні радіохвилі, котрі повторюють кривизну Землі. Такі системи, як і дві перераховані вище не відрізняються значною точністю [13].

- Контрбатареїні радіолокаційні станції

Контрбатареїна радіолокаційна станція слугує для визначення позиції та відстані до позиції, з якої ведеться артилерійський обстріл. Основною задачею таких станцій є захоплення позиції снаряду у польоті та відслідковування його траєкторії досить довгий час для того, щоб мати змогу розрахувати траєкторію його польоту та визначити позицію, з якої він був випущений. До появи сучасних радіолокаційних пристроїв з достатньою обчислювальною потужністю такі радіолокаційні станції не могли давати досить точних результатів, оскільки велика кількість обчислень повинна була виконуватись вручну та традиційний зондуєчий сигнал (ЗС) повинен був точно потрапити на снаряд для того, щоб хоча б визначити його присутність. Складність застосування таких станцій також

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						6
Зм	Лис	ЛЮ	ЛЮ	ЛЮ		

була викликана відносно малими розмірами снарядів та, відповідно, їх малою відбивною здатністю [13].

- Метеорологічна радіолокаційна станція

Зазвичай такі станції представляють собою імпульсні доплерівські радари, які використовуються для виявлення небезпечних погодних умов (урагани, гради, грози) та прогнозування погоди. Такі радари здатні виявляти рухи краплин та інтенсивність опадів, даючи змогу більш точно аналізувати структуру шторму та його змогу призвести до серйозних погіршень погоди. Метеорологічний радар посиляє направлені імпульси мікрохвильового випромінювання, що тривають порядку мікросекунди, а за рахунок довжини хвилі, яка приблизно в десять разів перевищує розміри частинок частина енергії імпульсу відбивається в напрямку радіолокаційної станції. Таким чином, короткі хвилі краще підходять для малих частинок, але такі радіолокаційні системи обмежені у дальності, оскільки зондуючий сигнал розсіюється швидше, ніж при використанні довгохвильових сигналів. Дані з таких радіолокаційних станцій дають змогу визначити тип опадів, висоту, швидкість та відстань до таких скупчень грозових хмар або інших катаклізмів [13].

- Радіолокаційні станції контролю повітряного руху

Зазвичай такі станції розміщені у аеропортах та слугують для визначення позиції та відслідковування багатьох цілей (літаків) та їх супроводу. Такі станції зазвичай обладнані двома радаром – один з них відслідковує цілі на великих відстанях та може мати досить велику похибку за відстанню, натомість допоміжний радар повинен точно надавати інформацію про відстані між літаками [13].

- Радіолокатор точного заходу на посадку

Радіолокатор точного заходу на посадку є типом радіолокаційної системи, що призначений для визначення бокового та вертикального наве-

дення пілота для досягнення посадкової позиції. В таких радарх використовується дисплей з двома лініями, які показують відхилення літака по вертикалі і горизонталі від траєкторії ідеального заходу на посадку.

2. Радіолокаційні станції наведення цілі [13].

У радіолокаційних станцій наведення цілі використовується той самий принцип дії, що і у пошукових РЛС, але вони сканують набагато менші об'єми простору, проте роблять це набагато частіше, приблизно кілька разів за секунду.

До систем наведення цілі відносяться:

- Ракета повітря-повітря

Така ракета призначена для застосування в системах озброєння винищувачів, фронтових бомбардувальників та штурмовиків. Вона здатна перехоплювати високоманеврові засоби повітряного нападу та розвідку при атаці в будь-який час доби при будь-яких метеорологічних умовах на фоні землі, повітря та водного простору [14].

- Ракета повітря-поверхня або повітря-земля

Таке ракетне озброєння призначене для знищування військової техніки, оборонних споруд (опорні пункти, контрольно-спостережні пункти), об'єкти інфраструктури (мости, бетонні злітно-посадкові смуги).

Через те, що технології радіолокації отримали значне поширення та мають під собою добре вивчену теоретичну базу, науковці та інженери розробили велику кількість радарів, які використовуються в багатьох галузях. Одним із найбільш поширених застосувань радарів має місце у оборонній сфері, де ці пристрої застосовуються для багатьох цілей, зокрема, контроль повітряного простору, наведення та керування ППО та охорони режимних об'єктів [14].

1.2 Типова структура радіолокаційної станції з імпульсним та неперервним зондуючим сигналом

Імпульсні та неперервні сигнали слугують для багатьох задач в радіочастотних та мікрохвильових системах, зокрема в системах передачі голосу, відеозв'язку та передачі даних, радіоборотьбу, спостереження та радіолокацію. Імпульсні сигнали залишаються активними (увімкненими) протягом коротких проміжків часу та можуть використовуватись як з певною формою модуляції (амплітудна, частотна, фазова модуляція), так і без неї. Неперервні сигнали активні постійно та можуть також використовувати певну форму модуляції (перераховані для імпульсних сигналів) для роботи у радарх або системах зв'язку [8].

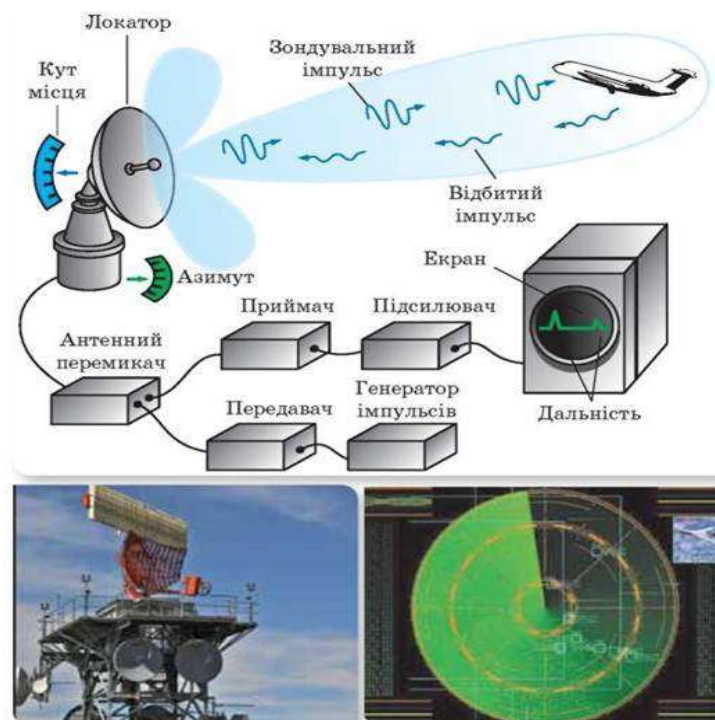


Рисунок 1.1 — Схема роботи РЛС із зондуючим сигналом

Обидва типи систем використовують велику кількість активних та пасивних компонентів для обробки сигналів, котрі характеризуються по-різному. Але кожен з них може ефективно виконувати функції системного рівня при різних параметрах системи (розміри, рівень потужності), що дає розробникам велику гнучкість при визначенні цілей для параметрів системи та її продуктивності [8]. Як вже було сказано вище, випромінювач неперервного зондуючого сигналу випромінює сигнал у кожен момент часу, на відміну від імпульсного.

Одним із варіантів реалізації імпульсного зондуючого сигналу є одноімпульсна система, у якій вся необхідна інформація передається за один імпульс зондуючого сигналу, але ця реалізація мало коли застосовується у радіолокаційних системах, оскільки не дає можливості стабільно відслідковувати параметри цілі. Однією із головних задач при виборі між неперервним та імпульсним зондуючим сигналом є вирішення експлуатаційних компромісів, зокрема компромісу у використанні енергії.

Розробник радіолокаційної системи має визначити найбільш вигідний підхід та порівняти затрати енергії на підсилення неперервних сигналів та підсиленням амплітуд сигналів, що повинні генеруватись та оброблятись лише у певні моменти часу. Імпульсні сигнали часто використовуються у радіолокаційних системах, але використання неперервних сигналів також не є виключенням, наприклад, у комерційних радарх, у системах адаптивних систем допомоги водію, які реалізовані у сучасних електронних системах безпеки автомобілів. Імпульсні радарні системи передають короткі імпульси та розраховують відстань до цілі за допомогою вимірювання затримки між переданим імпульсом та відбитим від цілі сигналом. Радар, що використовує неперервні сигнали, наприклад, частотно-модульований радар з неперервним зондуючим сигналом, передає постійний потік лінійно модульованих сигналів та розраховує відстань від передатчика до цілі шляхом розрахунку різниці між частотами переданого зондуючого сигналу (відома величина) та прийнятого сигналу [9].

Неперервний зондуючий сигнал з частотною модуляцією дає змогу досить точно визначати відстань до цілі, яка може вимірюватись порядками десятків сантиметрів, натомість радіолокаційні системи, що використовують імпульсні зондуючі сигнали, не можуть дати настільки якісні та точні результати. Але якщо у задачі розроблюваної радіолокаційної станції входить виявлення об'єктів на великих відстанях, доцільніше використовувати імпульсні зондуючі сигнали, оскільки при їх використанні можна добитись високого відношення рівню сигналу до рівня шуму та допустимої точності при визначенні дальності до цілі [9].

Якщо брати до уваги РЛС з неперервним лінійним частотно-модульованим сигналом, то вони найчастіше використовуються в автомобільних радіолокаційних системах. Головна ідея полягає в генеруванні лінійного частотно-модульованого імпульсу сигналу. Різниця в частоті сигналу, що передається і сигналу, що надходить на вхід, виявляється пониженням частоти. Оскільки для того, щоб виявити дальність та швидкість цілі недостатньо інформації, що надходить від одного імпульсу, необхідно згенерувати декілька послідовних імпульсів.

$$f_T(t) = f_c + \frac{B}{T} * t, \quad (1.1)$$

де $f_T(t)$ – частота для одного імпульсу;

B – ширина смуги;

T – тривалість.

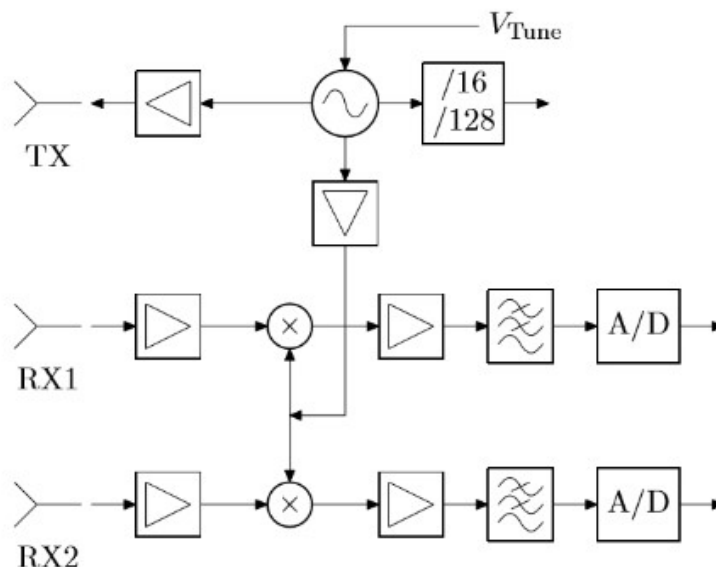


Рисунок 1.2 – Схема РЛС з неперервним лінійним частотно-модульованим сигналом

До переваг радіолокаційних систем що використовують імпульсний зондуєчий сигнал належить більша відстань детектування цілі у порівнянні з системами, що використовують неперервний зондуєчий сигнал з меншим споживанням енергії для живлення передавача та приймача сигналу. Натомість неперервний зондуєчий сигнал надає неперервний потік даних про параметри цілі з більшою точністю та не має обмеження на мінімальну відстань до цілі [9]. Одним з недоліків систем з неперервним зондуєчим сигналом є простота

детектування, у порівнянні з системами, що використовують імпульсні зондуючі сигнали. Також для радіолокаційної станції, що використовує неперервний зондуючий сигнал, швидше та простіше знайти сигнал, що буде вносити перешкоди у роботу радару тому, що сигнал набагато простіше виявити та проаналізувати. Натомість, радіолокаційні системи, що використовують імпульсні зондуючі сигнали, зокрема дуже короткі за тривалістю імпульси, наприклад надширокосмугові (ultrawideband) радіолокаційні системи, надзвичайно складно виявити, особливо коли потужність зондуючого сигналу, що надсилає радіолокаційна станція, дуже низька. Наприклад, радіолокаційна станція, що працює на частоті 24 ГГц та використовує імпульсний зондуючий сигнал та надсилає імпульси тривалістю в часі порядку декількох наносекунд, може мати смугу пропускання шириною 8 ГГц, але в той же час необхідна потужність сигналу, що потрібний для роботи радару, буде складати лише 4мВт. Таким чином, під час випромінювання радіолокаційною станцією зондуючого сигналу, рівень потужності сигналу не буде надто відрізнятися від оточуючого шуму та його буде дуже важко виявити, особливо у порівнянні з неперервним зондуючим сигналом [8]. Радіолокаційні системи з імпульсним зондуючим сигналом випромінюють послідовність імпульсів із заданою тривалістю. Протягом часу між імпульсами передавач вимикається та не споживає енергію. Незважаючи на це, приймач повинен бути підключеним до живлення та працювати весь час, оскільки радіолокаційна станція повинна мати можливість приймати сигнали, що відбиваються ціллю або повертаються іншими станціями. Натомість у радіолокаційних станціях, що використовують неперервний зондуючий сигнал, передавач та отримувач сигналу повинні постійно бути підключеними до живлення та бути в роботі, щоб отримувати відбитий та передавати зондуючий сигнали. Зважаючи на цю умову, розробнику необхідно вжити заходів щодо ізоляції передавача та приймача сигналів один від одного, щоб не допустити ситуації, в якій вони взаємно блокують та перешкоджають роботі один одного. Зазвичай одним із способів досягнення цієї задачі є використання низьких потужностей зондуючого сигналу у радіолокаційних системах з непе-

первним зонduючим сигналом, але таке рішення проблеми значно зменшує дальність, на якій така станція може виявити ціль [9]. Також, у випадку рухомої цілі, рух цілі відносно радіолокаційної станції спричиняє Допплерівський зсув фази у частоті відбитого сигналу.

$$F_{\text{д}} = \frac{2V_{\text{ц}}}{\lambda} * \cos \alpha, \quad (1.2)$$

де $V_{\text{ц}}$ – швидкість цілі;

λ – довжина хвилі;

У результаті даного явища радіолокаційна станція, що використовує імпульсний зонduючий сигнал та здатна обчислювати вплив такого ефекту, може визначити швидкість цілі відносно радіолокаційної станції. Натомість станція, що використовує неперервний зонduючий сигнал з частотною модуляцією, у якій використовується частота відбитих сигналів, може визначити відстань до цілі зі значними похибками [1].

Таким чином, у таких радіолокаційних системах необхідно використовувати різноманітні стратегії та алгоритми зміни частоти з часом для того, щоб станція могла точно визначити відстань до цілі. Для підсилення сигналу можуть використовуватись як твердотільні, так і електронно-лампові підсилювачі у радіолокаційних системах як з імпульсними, так і з неперервними зонduючими сигналами. Проте, для цього проекту найраціональнішим буде обрати радіолокаційну систему з зонduючим сигналом у вигляді прямокутного радіоімпульсу, оскільки вона простіша у виготовленні та найкраще підходить під задачі РЛС.

1.3 Порівняння зонduючих сигналів радіолокаційної системи

Сигнал, що випромінює активна РЛС грає роль інструменту дослідження простору радіолокаційного спостереження та називається зонduючим сигналом. Для опису та аналізу зонduючого сигналу використовують їх параметри і характеристики: енергетичні, часові, частотні та частотно-часові.

Основні енергетичні параметри зонduючого сигналу:

P_i – імпульсна потужність;

$P_{\text{ср}} = P_i / Q_c$ – середня потужність ($Q_c = T_n / t_i$ – скважність сигналу);

					<i>PT71.464532.001 ПЗ</i>	Лист
						13
Зм	Лис	Модифікація	Підпис	Дата		

E_c – енергія сигналу;

До часових параметрів відносяться:

t_i – тривалість імпульсу;

T_n – період повторення;

До частотних параметрів зондуючого сигналу відносяться:

f_0 – несуча частота;

Δf_c – ширина спектру сигналу;

Більшість засобів та алгоритмів оброблення сигналів працюють по принципу апріорної популярності основних радіотехнічних параметрів сигналу, таких як несуча частота чи вид модуляції сигналу [18].

Фазоманіпульовані сигнали застосовуються в системах радіозв'язку, так як вони сприяють підвищенню ступеня завадостійкості системи та рівня електромагнітної сумісності, а також дозволяють найбільш ефективно використовувати радіодіапазон каналу. В даному підрозділі розглянемо фазоманіпульовані сигнали, тобто сигнали, в процесі маніпуляції яких змінюється фаза. Опишемо аналітичний несучий сигнал наступним виразом:

$$s(t) = A \cos(\omega t + \theta), \quad (1.3)$$

де A – амплітуда;

ω – початкова частота;

θ – фаза несучого коливання.

Тоді вираз для фазоманіпульованого сигналу буде мати вигляд:

$$s_m(t) = A \cos(\omega t + \theta_j), \quad j = \overline{1, J} \quad (1.4)$$

Як видно із (1.4), при фазовій маніпуляції відбувається зміна фази θ [18].

Коди Баркера є одним із можливих засобів двофазної модуляції, який застосовується у радіолокаційних станціях для покращення роздільної здатності відстані для випадків, коли тривалість імпульсу зондуючого сигналу досить велика. Коди Баркера являють собою послідовності чисел різної довжини, які можуть складатися з 1 та -1 та повинні задовольняти умові автокореляції якнайкраще, тобто таким чином, щоб амплітуди бічних пелюсток після цього були менші або дорівнювали 1. Коди Баркера названі на честь їх відкривача, Річарда Баркера, який дослідив 6000 многочленів у своїй роботі, виданій 1953

					<i>PT71.464532.001 ПЗ</i>	Лист
						14
Зм	Лис	Модифікація	Підпис	Дата		

року. У результаті роботи дослідник отримав 9 кодів, які носять його назву [18]. За властивостями автокореляційної функції (АКФ) коди Баркера схожі на лінійні частотно модульовані імпульси, які також використовуються в радіолокації. Автокореляційна функція послідовності Баркера має наступний вигляд:

$$R(t) = \begin{cases} N, n = 0 \\ 0, n = 2 * i + 1 \\ \pm 1, n = 2 * i \end{cases} \quad (1.5)$$

В наш час в РЛС для кодування фази зонduючого сигналу широко використовують коди Баркера. Вони являються оптимальними кодами. Їх оптимальність полягає в тому, що амплітуда піку автокореляційної функції дорівнює N , а значення бокових пелюсток – 1, де N – число елементів або довжина коду. Істотним недоліком, що обмежує можливість їх використання для кодування сигналів в РЛС, є мала довжина коду, так як до сих пір не знайдено кодів Баркера довжиною більше 13 елементів. Структура послідовностей максимальної тривалості аналогічна структурі випадкових послідовностей і, відповідно, вони володіють необхідними АКФ. Для їх формування використовують генератори на регістрах зсуву з лінійними зворотними зв'язками, які є простими та зручними пристроями. Коди Баркера оптимальні в можливості утворення сигналу у вигляді кінцевої послідовності імпульсів, у якого рівень бокових пелюсток нормованої АКФ має величину не вище $1/M$, де M – довжина кодової послідовності. Бінарні коди Баркера існують тільки для довжин не більше $M = 13$. Вони використовуються для побудови фазокодоманіпульованих сигналів. Такий сигнал, модульований послідовністю Баркера довжиною $M = 13$, описується виразом:

$$S(t) = \sum_{m=1}^M A \cos(2\pi f_0(t - (m - 1)\tau_0 + \varphi_m)), 0 \leq t \leq \tau_0 \quad (1.6)$$

де A – амплітуда сигналу;

φ_m приймає значення $\{\pi; \pi; \pi; \pi; \pi; 0; 0; \pi; \pi; 0; \pi; 0; \pi\}$.

Повна ширина головного пелюстка АКФ сигналу з кодом Баркера складає $2\tau_0$. Рівень бокових пелюсток АКФ сигналу з кодом Баркера з $M = 13$ має рівень рівний $\frac{1}{13} \approx 0,08$ або $-22,3$ дБ [18].

Прикладом реалізації РЛС з таким зондуючим сигналом є вітчизняна РЛС РНДЦ СБР-3. В цій РЛС використовується послідовність максимальної довжини з числом елементів в коді $N = 1023$. Довжина елемента коду в даній РЛС дорівнює 0,33 мкс, що відповідає ширині спектру сигналу порядку 6 МГц. Потужність зондуючого сигналу дорівнює 60 мВт. Вказані параметри сигналу та неперервний режим його випромінювання не забезпечує РЛС СБР-3 необхідної прихованості роботи та завадостійкості. При цьому дальність дії РЛС не може перевищувати 4-5 км. Вказані обмеження зумовлені в першу чергу неможливістю забезпечити необхідну розв'язку між її приймальними та передавальними трактами при роботі з однією антеною. Таким чином, з урахуванням даних, можна зробити висновок, що в РЛС РНДЦ можуть використовуватись як шумові сигнали, які створюються за допомогою прямошумових генераторів, так і фазокодоманіпульовані сигнали на основі використання послідовностей максимальної тривалості. Вибір того чи іншого сигналу визначається можливістю їх формування та обробки цифровими методами в необхідній смузі частот [1].

Послідовність прямокутних імпульсів складається з імпульсів, що повторюються через рівні проміжки часу. Прямокутна форма виникає через те, що сигнал різко зростає від мінімального до максимального значення та затримується на деякий час і знову повертається до мінімального значення. Для генерації прямокутних імпульсів ідеальної форми, сигнал повинен миттєво перейти від мінімального до максимального значення амплітуди. Повне повторення форми імпульсу через певний проміжок часу називається періодом T , а ширина імпульсу чи дальність – це проміжок, за який сигнал досягає мінімальної амплітуди двічі [12].

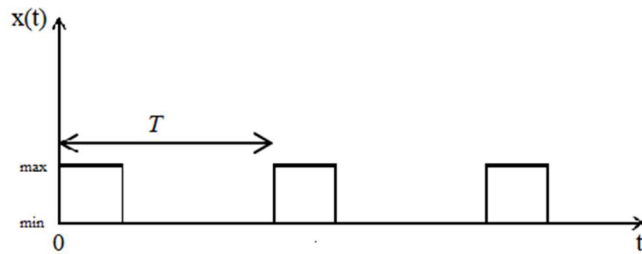


Рисунок 1.3 – Вигляд ідеальної послідовності прямокутних імпульсів

Імпульсні сигнали використовуються, як правило, для огляду простору. В залежності від внутрішньоімпульсної модуляції одиночні радіоімпульси поділяються на прості, тобто немодульовані, та лінійні частотно-модульовані радіоімпульси, тобто з внутрішньоімпульсною лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ). Для виявлення цілей на малих висотах (менше 1 кілометра) доцільно використовувати неперервні зондуючі сигнали. Як і у випадку з одиночними радіоімпульсами, неперервні сигнали можуть бути немодульованими або лінійно частотно-модульованими. Радіоімпульс з ЛЧМ є складним сигналом. Лінійний частотно-модульований радіоімпульс представляє собою сигнал, у якого протягом тривалості імпульсу t_i частота змінюється по лінійному закону (див. рис.1.4) [3].

$$f(t) = \frac{f_k - f_n}{\tau_i} t + f_n = f_n + \frac{\Delta f_d t}{\tau_i}, \quad (1.7)$$

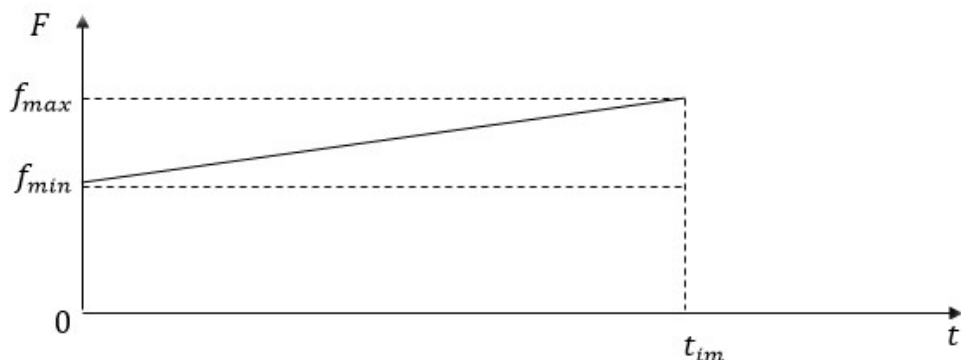


Рисунок 1.4 — Закон зміни частоти ЛЧМ радіоімпульсу

Тобто час кореляції ЛЧМ імпульсу є в n разів меншим за відповідний час простого прямокутного імпульсу тієї ж тривалості. Відповідно, ЛЧМ сигнал

здатний забезпечити в n разів кращу роздільну здатність по дальності, ніж простий радіоімпульс. В реальності для ефективної роботи ці параметри необхідно визначити відповідно до задач РЛС.

Для радіолокаційної системи охорони периметру є пріоритетним виявлення об'єкту, що перетинає зону контролю, аніж оцінка швидкості та дальності цілі. Тому, на основі проведених порівнянь, вибрано радіолокаційну систему із зондуючим сигналом у вигляді звичайного радіоімпульсу. Він є достатнім для виконання задач, що поставлені для даної РЛС, а також є простішим та дешевшим у виробництві.

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						18
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПІДХОДИ ДО РОЗРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ МАЛОЇ ДАЛЬНОСТІ

2.1 Формування зонduючого сигналу для радіолокаційної станції малої дальності

В зазначеній радіолокаційній системі використовується у якості зонduючого сигналу прямокутний радіоімпульс. Структурна схема підсистеми формування ЗС представлена на Рисунку 2.1.

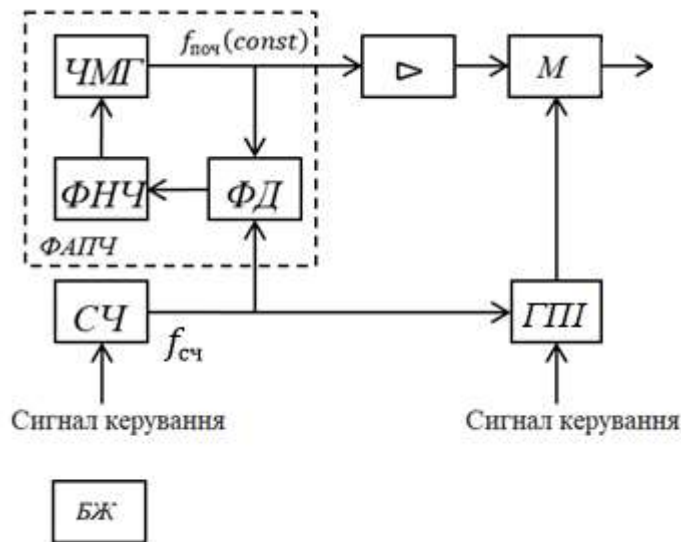


Рисунок 2.1 – Схема формування зонduючого сигналу

Основою формування є синтезатор частоти (СЧ), який видає гармонійний сигнал на частоті $f_{сч} = 200$ МГц. Опорна частота потрапляє до підсистему фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), на виході якого забезпечується високостабільний когерентний сигнал $f_{поч}$. Очікувана стабільність частоти повинна бути не гірше, ніж 0,1%. В той самий час опорний сигнал з СЧ потрапляє до блоку генератора прямокутних імпульсів (ГПП) [3].

Параметри прямокутних, визначені під час розрахунку основних характеристик ЗС РЛС: довжина радіоімпульсу $t_i = 0,04$ мкс, частота повтору випромінювання ЗС 300 кГц. В модуляторі (М) відбувається амплітудна модуляція гармонійних коливань, в результаті чого отримуємо ЗС у вигляді прямокутного радіоімпульсу на проміжній частоті 200 МГц [3].

2.2 Формування діаграми спрямованості антенної системи радіолокаційної станції охорони периметру

Антени – це пристрої, які призначені для випромінювання та прийому електромагнітних хвиль. У системах радіозв'язку передавальна антена випромінює вироблену передавачем і підведену фідером енергію в навколишній простір, частіше усього в заданому напрямку. Частина цієї енергії досягає приймальної антени, в якій виникають електромагнітні коливання, що впливають, за допомогою лінії передачі, на вхід приймача. Рупорна антена відноситься до класу апертурних антен, тобто таких, що випромінюють електромагнітні хвилі через деяку поверхню розкриття. Рупорні антени використовують для збільшення спрямованості та зменшення відбиття від відкритого кінця хвилеводу [16].

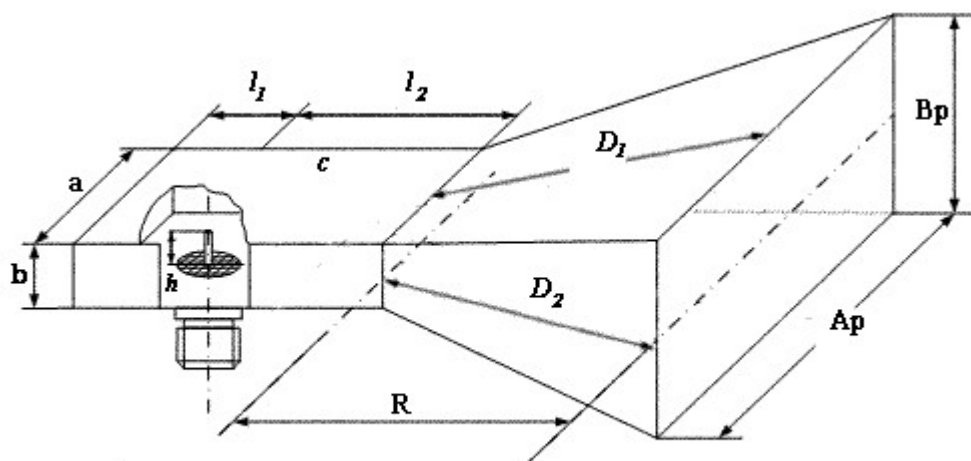


Рисунок 2.2 – Рупорна антена

Результати розрахунків, на основі вихідних параметрів антенної системи [17]:

Центральна частота f : 4000 МГц;

Довжина хвилі у вільному просторі λ : 75 мм;

Підсилення антени: 16 дБ;

Вхідний опір: 50 Ом;

Розраховані геометричні розміри антенної системи (рупора) та її основні характеристики [17]:

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

20

Ширина основного пелюстка по рівню 3дБ в горизонтальній площині $\Delta\Phi_H$: 23°;

Ширина основного пелюстка по рівню 3дБ в вертикальній площині $\Delta\Phi_V$: 20°;

Розміри хвилеводу $a \times b \times c$: 56 x 28 x 74 мм;

Смуга пропускання хвилеводу ΔF : 3333-5000 МГц;

Довжина хвилі у хвилеводі λ_g : 101 мм;

Розміри розкриву рупора $A_p \times B_p$: 255 x 170 мм;

Довжина рупора R : 225 мм;

Довжина широкої грані рупора $D1$: 235 мм;

Довжина вузької грані рупора $D2$: 246 мм;

Висота елемента живлення хвилеводу h : 15.6 мм;

Відстань від елемента живлення хвилеводу до задньої стінки хвилеводу $l1$: 25 мм;

Відстань від елемента живлення хвилеводу до горловини рупору $l2$: 48 мм;

В програмі CST Microwave Studio побудували тривимірну модель рупорної антени на частоті 4 ГГц.

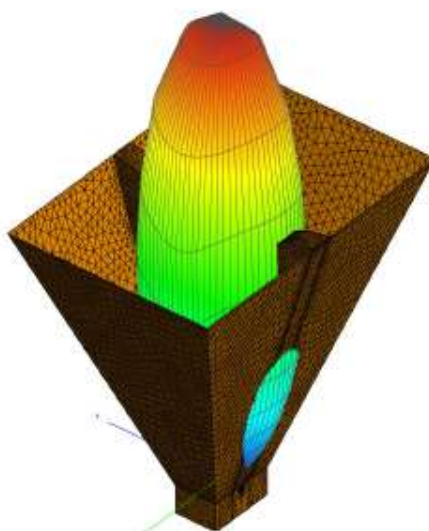


Рисунок 2.3 – Тривимірний вигляд діаграми спрямованості рупорної антени

Діаграма спрямованості (ДС) – це залежність напруженості поля, яке створює антена, від просторових кутів спостереження в просторі при постійній

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист

21

відстані та незмінних умовах збудження. Для технічного застосування діаграм спрямованості розглядають в двох перпендикулярних площинах. Це площини електричного вектору E та магнітного вектору H [15].

З використанням вищезазначеного програмного забезпечення побудували діаграми спрямованості в E та H площинах.

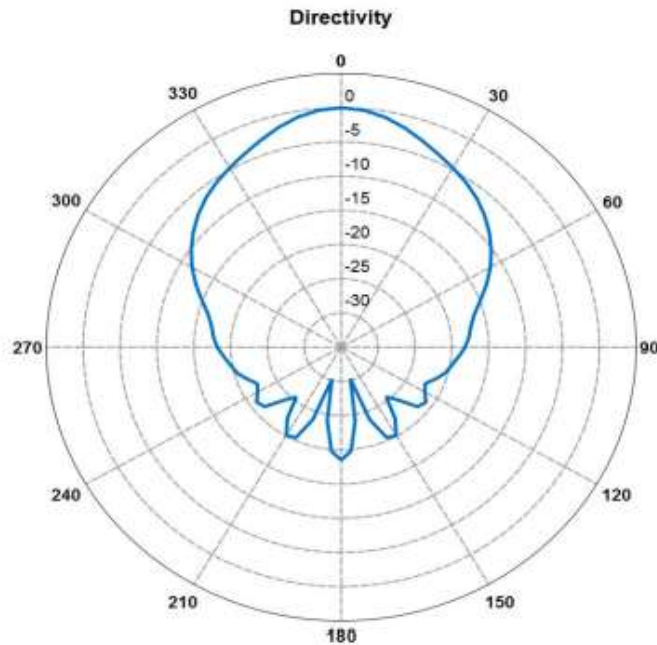


Рисунок 2.4 – Діаграма спрямованості в E площині

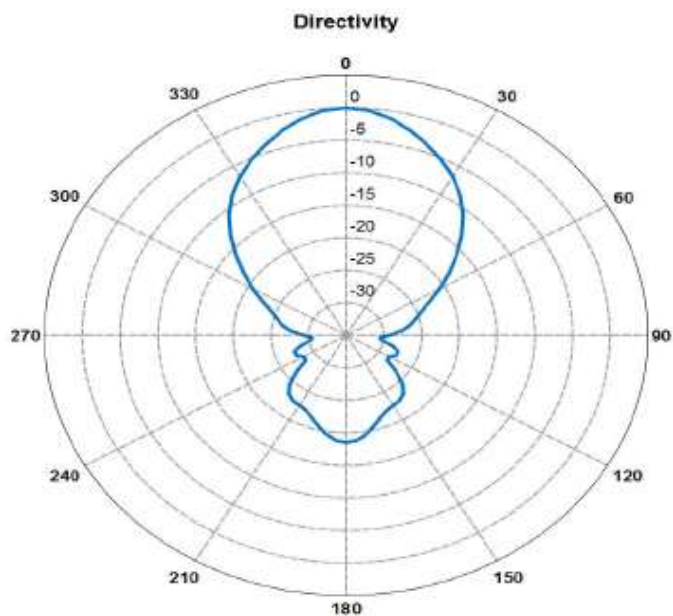


Рисунок 2.5 – Діаграма спрямованості в H площині

Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) – це відношення найбільшого значення амплітуди електричного або магнітного поля стоячої хвилі до найменшого.

Зм.	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист
22

$$КСХ = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}, \quad (2.1)$$

де Γ – коефіцієнт відбиття;

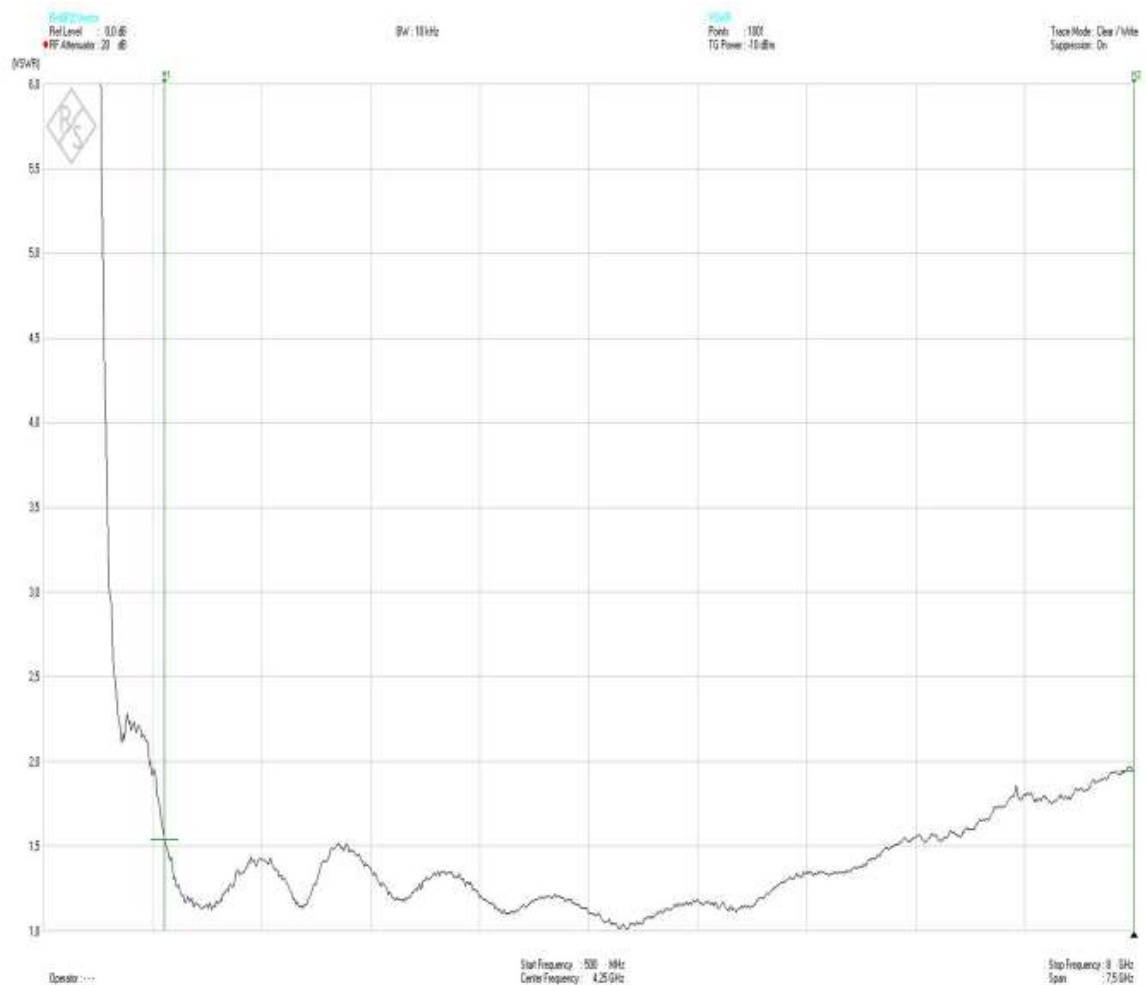


Рисунок 2.6 – Коефіцієнт стоячої хвилі рупорної антени

Рупорна антена задовольняє вимогам якісної роботи РЛС з радіоімпульсом шириною спектру 21 МГц та робочою частотою 4 ГГц.

2.3 Розробка конфігурації багатопозиційного радіолокаційного комплексу охорони периметру з складною геометрією

Для охорони важливих об'єктів організовується периметр, несанкціоноване перетинання якого повинно викликати сигнал тривоги. Для спостереження за цим периметром в складних погодних умовах доцільно застосувати радіолокаційні системи спостереження простору вздовж периметру охорони. Визначається довжина мінімального прямого відрізка периметру, що охороняється, ширина смуги контролю перед периметром, яка забезпечує завчасне реагування системи на факт перетинання самої межі.

Ширина смуги контролю визначається параметрами ДС антени, яка випромінює радіолокаційний сигнал у відповідному секторі вздовж периметру. У горизонтальній площині a , у відповідності від відстані до точки розташування РЛС [2].

$$a = r * \sin \theta, \quad (2.2)$$

де r – висота;

θ – ширина ДС антени в вертикальній та горизонтальній площині.

Таблиця 2.1 – Варіація ширини зони контролю у вертикальній та горизонтальній площині в залежності від відстані

$a = r * \sin 20^\circ$		$b = r * \sin 23^\circ$	
$r = 50$	$a = 19,5$	$r = 50$	$a = 17$
$r = 100$	$a = 39$	$r = 100$	$a = 34$
$r = 200$	$a = 78$	$r = 200$	$a = 68$
$r = 300$	$a = 117$	$r = 300$	$a = 102$
$r = 400$	$a = 156$	$r = 400$	$a = 136$
$r = 500$	$a = 195$	$r = 500$	$a = 170$

Діаграма спрямованості, яка забезпечує огляд контрольного простору вздовж периметру охорони, представлена на Рисунку 2.7.

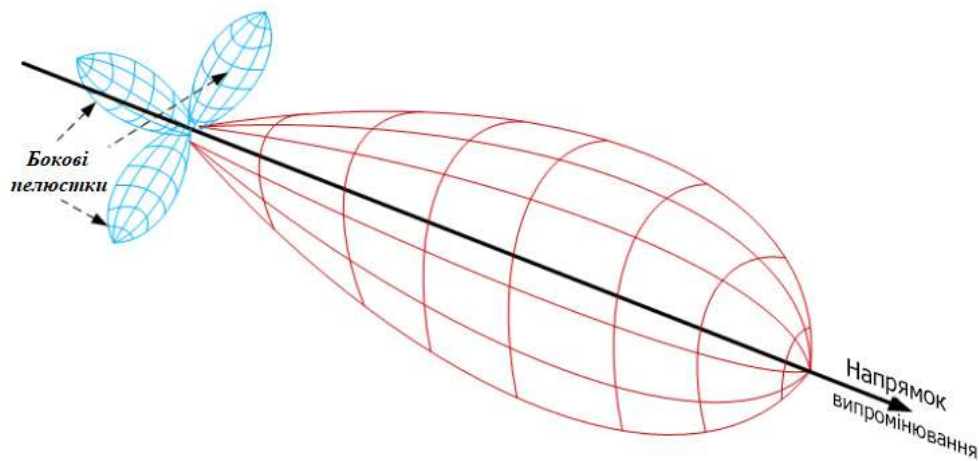


Рисунок 2.7 – Діаграма спрямованості вздовж зони контролю

При побудові охоронної зони важливою умовою є замкнутість периметру охорони, що забезпечить контроль цілісності РЛС, шляхом розташування її в зоні контролю попередньої аналогічної РЛС, а також необхідно передбачити перекриття сліпої зони біля РЛС діаграмою направленості антени поряд розташованої РЛС. При цьому РЛС повинна бути розташована на осі ДС антени.

Наведено приклад мінімальної конфігурації периметру.

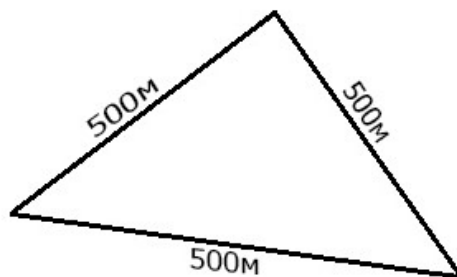


Рисунок 2.8 – Мінімальна конфігурація периметру зони контролю

Розрахунок периметру мінімальної конфігурації зони контролю:

$$P = 3 * a = 3 * 500 = 1500 \text{ м}, \quad (2.3)$$

де a – довжина сторони.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист
25

Розрахунок площі мінімальної конфігурації зони контролю:

$$S = \frac{1}{2} * a * h = 108250 \text{ м}^2, \quad (2.4)$$

де h – висота трикутника.

У разі необхідності побудувати зону обзору з складною геометрією, необхідно сформувати периметр, що охороняється у вигляді замкнутого багатокутника [2]. На Рисунку 2.9 наведено приклад шестикутної конфігурації периметру охорони.

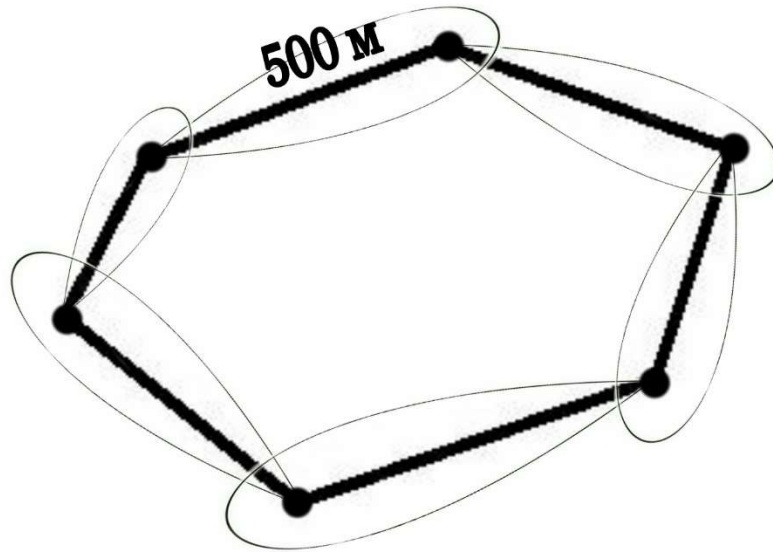


Рисунок 2.9 – Варіант побудови периметру зони, що охороняється у формі замкнутого шестикутника

Оскільки така конфігурація периметру охорони є більш раціональнішою, потрібно розрахувати її периметр:

$$P = 6 * a = 6 * 500 = 3000 \text{ м}, \quad (2.5)$$

де a – довжина сторони.

Також необхідно розрахувати площу цієї зони охорони:

$$S = p * r = 1500 * 433 = 649500 \text{ м}^2, \quad (2.6)$$

де p – півпериметр;

r – радіус.

Така побудова зони, що охороняється має недолік, а саме надлишкова площа, яка потрапляє в зону охорони, окрім самого об'єкту охорони. Проте,

при побудові замкнутого багатокутника ми забезпечуємо надійну охорону наших РЛС. Автоматизоване робоче місце оператора охорони може бути розташовано в будь-якій точці в середині замкнутого периметру. Наші РЛС дозволяють розрізняти об'єкти, що перетинають кордон, якщо між ними буде мінімум 7 м. Така роздільна здатність достатня для виявлення факту перетинання периметру охорони та зможе розрізнити людину або групу людей від автомобіля або інших механічних транспортних засобів в будь-яких погодних умовах.

Таким чином, визначена основна конфігурація побудови системи охорони радіолокаційними засобами важливих об'єктів. Обрано вид ЗС, підсистеми його формування та антенної системи за критерієм «ефективність-вартість».

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата		27

3 РОЗРОБКА РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ОХОРОНИ ПЕРИМЕТРУ

3.1 Узагальнена структурна схема радіолокаційної системи охорони периметру

Представлена структурна схема (Рисунок 3.1) розкриває принцип побудови та роботи радіолокаційної системи охорони периметру. Основою роботи РЛС є формування зонduючого сигналу необхідної форми та з визначеними параметрами. На схемі зображена «підсистема формування зонduючого сигналу». Зміст роботи зазначеної підсистеми розкрито у розділі 2.1 цього дипломного проекту. Зонduючий сигнал на проміжній частоті $f_{\text{пр}}$ поступає на перетворювач частоти в якому він змішується з сигналом від гетеродина $f_{\text{г}}$ та після змішувача радіолокаційний сигнал на робочій частоті $f_{\text{р}} = f_{\text{пр}} + f_{\text{г}}$ потрапляє до вихідного каскаду передавача – підсилювача потужності (ПП). Підсилювач забезпечує задану потужність вихідного сигналу, яка визначена під час розрахунків основних параметрів РЛС і забезпечує необхідну дальність радіолокації [3]. Електрична принципова схема та параметри блоку ПП розкриті в розділі 3.3.

Підсилений зонduючий сигнал через антенний перемикач (АП) випромінюється антенною системою. Відбитий сигнал від радіолокаційної цілі через антенну систему потрапляє до приймача безпосередньо на малошумний підсилювач прийнятого сигналу (МШП), смуга частот якого відповідає смузі ЗС сигналу з урахуванням зміщення спектру на максимальне значення $F_{\text{д}}$.

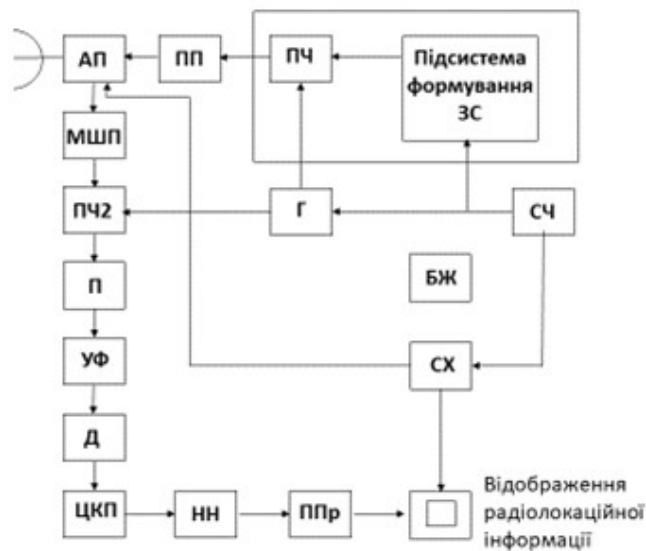


Рисунок 3.1 – Структурна схема радіолокаційної системи

Підсилений сигнал поступає на перетворювач частоти (ПЧ2) на інший вхід якого поступає сигнал від гетеродину f_r , в результаті ми отримуємо прийнятий сигнал, що відбитий від цілі на проміжній частоті $f_{пр} = f_p - f_r$. Далі сигнал потрапляє на узгоджений фільтр (УФ), який забезпечує на своєму виході оптимальне співвідношення сигнал/шум для нашого прямокутного ЗС. Детектором (Д) виділяється огибаюча прийнятого сигналу і в подальшому відбувається некогерентна обробка радіолокаційних сигналів на відеочастоті [13].

Для компенсації впливу пасивних перешкод в роботі РЛС від місцевих об'єктів (дерева, стовпи, поверхня землі), необхідно застосувати компенсатор пасивних перешкод, який будується по схемі віднімання прийнятих сигналів у попередні періоди зондування від сигналу, який був прийнятий щойно. Особливості цифрового компенсатора перешкоди РЛС охорони периметру полягає в тому, що більшість об'єктів будуть рухатися перпендикулярно вектору розповсюдження сигналу, у цьому випадку кут між напрямком руху цілі та вектором розповсюдження сигналу буде складати 90° , і $F_d = 0$. В такому випадку стандартний черезперіодний компенсатор (ЧПК) не зможе виділити рухому ціль на фоні місцевих об'єктів. Для вирішення цієї задачі пропонується застосувати цифровий компенсатор пасивної перешкоди (ЦКП), який запам'ятовує

відбитий сигнал від пасивних об'єктів, коли рухомі цілі відсутні і в подальшому здійснюється віднімання відомих відбитих сигналів від щойно прийнятого сигналу. У зв'язку з тим, що дальність роботи такої РЛС невелика, тому кількість інформації, яку необхідно запам'ятовувати дуже мала. Для підвищення ефективності виявлення радіолокаційних цілей здійснюється накопичення відбитого сигналу від радіолокаційної цілі під час кожного періоду зондування в блоці некогерентного накопичувача (НН). Для виявлення сигналу та прийняття рішення, що ціль є або немає застосовується пороговий пристрій (ППр). Отримана радіолокаційна інформація відображається на пристрої візуалізації радіолокаційної інформації, яка синхронізується з моментом початку випромінювання антени та поворотом антени на відповідний азимут [3].

3.2 Визначення основних параметрів радіолокаційної системи

Розрахунок тривалості імпульсу зондуючого сигналу:

$$t_i = \frac{2D_r}{c} = 4,667 * 10^{-8}, \quad (3.1)$$

де D_r – роздільна здатність;

c – швидкість світла.

З формули (3.1) визначаємо ширину спектру зондуючого сигналу:

$$\Delta f_c = \frac{1}{t_i} = 2,143 * 10^7 \quad (3.2)$$

Використовуючи значення $P_{лт}$ та $P_{пр}$, визначені технічним завданням, розрахуємо необхідне співвідношення сигнал/шум:

$$q = 2 * \left[\left(\frac{\ln\left(\frac{1}{P_{лт}}\right)}{\ln\left(\frac{1}{P_{пр}}\right)} \right) - 1 \right] = 129,126, \quad (3.3)$$

де $P_{лт}$ – ймовірність хибної тривоги;

$P_{пр}$ – ймовірність правильного виявлення цілі.

Розрахуємо співвідношення сигнал/шум, що надходить на вхід приймача при обробці одного імпульсу:

$$q_1 = \frac{q}{2} = 64,563 \quad (3.4)$$

Розрахуємо це співвідношення у децибелах:

$$q1_{дБ} = 10 * \log(q1) = 18,1 \quad (3.5)$$

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						30
Зм	Лис	Модифікація	Підпис	Дата		

Визначимо час опромінення цілі, коли вона буде перетинати зону контролю, ширина якої складає в середньому 62 м. Середня швидкість БПЛА, який може нести найбільшу небезпеку може складати 45 м/с. Відповідно, час опромінення $T_{оп} = \frac{62}{45} = 1,4$ с [11].

Розрахуємо кількість імпульсів, що поступають на вхід приймача РЛС за час опромінення цілі:

$$M = \frac{T_{оп}}{T_{п}} = 4,2 * 10^5, \quad (3.6)$$

де $T_{оп}$ – час опромінення цілі;

$T_{п}$ – час повтору.

Розрахуємо співвідношення сигнал/шум, що надходить на вхід приймача при некогерентному накопичуванні імпульсів:

$$Q = \frac{q}{2 * M} = 0,013 \text{ (} -18 \text{ дБ)} \quad (3.7)$$

Використовуючи значення постійної Больцмана k та шумової температури приймача $T_{пр}$, що визначені технічним завданням, розрахуємо спектральну щільність шуму:

$$N_0 = k * T_{пр} * \Delta f_c = 2,07 * 10^{-13} \quad (3.8)$$

Розрахуємо чутливість приймача:

$$P_{ч} = \frac{Q}{2} * N_0 \quad (3.9)$$

Також розрахуємо чутливість приймача в децибелах:

$$P_{дб} = 10 * \log(P_{ч}) = -167,983 \text{ дБ} \quad (3.10)$$

Знайдемо значення середньої потужності передавача:

$$P_{пр} = \frac{R_{max}^2 * 64 * \pi^3 * P_{ч}}{G^2 * E * l} = 0,022 \text{ Вт} \quad (3.11)$$

де R_{max} – максимальна дальність;

G – коефіцієнт підсилення антени;

E – ефективна площа розсіювання цілі;

l – довжина хвилі.

Усі вищеперераховані значення задані технічним завданням.

3.3 Передавач радіолокаційної системи охорони периметру

Для проектування передавача обираємо схему формування радіосигналу передавача з амплітудною модуляцією [1].

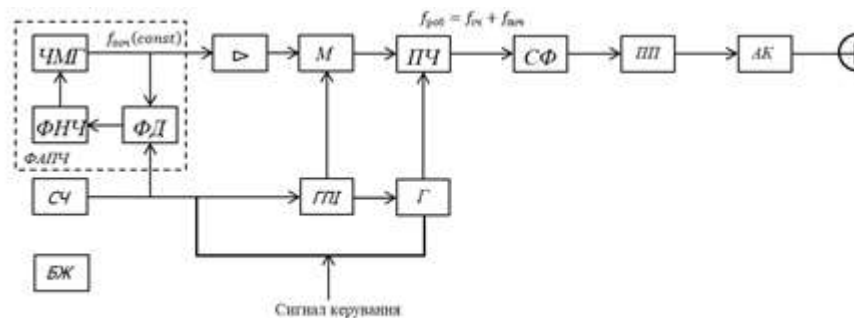


Рисунок 3.2 – Структурна схема передавача РЛС малої дальності

Формування радіосигналу здійснюється у частотному модуляторі середня частота якого $f_{\text{ноч}} < f_{\text{роб}}$. Стабілізація середньої частоти $f_{\text{ноч}}$ забезпечується системою ФАПЧ за допомогою високостабільних коливань опорного генератора $f_{\text{ог}}$. Опорний генератор генерує коливання з частотою 4 ГГц, отже $f_{\text{ноч}} = f_{\text{ог}} = 4$ ГГц.

Робочі частоти передавача формуються за допомогою перетворювача частоти (ПЧ), на входи якого підключений радіосигнал: $f_{\text{ноч}} = 4$ ГГц та коливання синтезатора частоти (СЧ) $f_{\text{сч}}$, частота яких залежить від обраного каналу. На виході ПЧ отримуємо радіосигнал, частота якого $f = (f_{\text{сч}} \pm f_{\text{ноч}})$. Смуговий фільтр забезпечує формування робочої частоти $f_{\text{роб}} = f_{\text{сч}} + f_{\text{ноч}}$ або $f_{\text{роб}} = f_{\text{сч}} - f_{\text{ноч}}$ [2].

При проектуванні радіопередавача використаємо цифровий синтезатор частоти з колом автоматичного підстроювання частоти (АПЧ). СЧ з колами АПЧ забезпечують формування коливань в широкій смузі частот (десятки ГГц) з певною інерційністю.

Таблиця 3.1 – Розрахунки коефіцієнту ділення N_i

$N_1 = \frac{199,9500}{0,0125} = 15996$	$N_6 = \frac{200,0125}{0,0125} = 16001$
$N_2 = \frac{199,9625}{0,0125} = 15997$	$N_7 = \frac{200,0250}{0,0125} = 16002$
$N_3 = \frac{199,9750}{0,0125} = 15998$	$N_8 = \frac{200,0375}{0,0125} = 16003$
$N_4 = \frac{199,9875}{0,0125} = 15999$	$N_9 = \frac{200,0500}{0,0125} = 16004$
$N_5 = \frac{200,0000}{0,0125} = 16000$	$N_{10} = \frac{200,0625}{0,0125} = 16005$

3. Розраховується значення ПЗКД B_i за формулою:

$$B_i = \frac{N_i}{p} \quad (3.14)$$

$$B_1 = \frac{15996 \dots 15605}{64} = 250 \quad (3.15)$$

4. Розраховується значення ПЗКД A_i

$$A_i = N_i - B_i * p \quad (3.16)$$

Розрахунки занесемо у таблицю.

Таблиця 3.2 – Розрахунки значень ПЗКД

$A_1 = 15996 - 250 * 64 = -4$	$A_6 = 16001 - 250 * 64 = 1$
$A_2 = 15997 - 250 * 64 = -3$	$A_7 = 16002 - 250 * 64 = 2$
$A_3 = 15998 - 250 * 64 = -2$	$A_8 = 16003 - 250 * 64 = 3$
$A_4 = 15999 - 250 * 64 = -1$	$A_9 = 16004 - 250 * 64 = 4$
$A_5 = 16000 - 250 * 64 = 0$	$A_{10} = 16005 - 250 * 64 = 5$

Усі результати заносимо у таблицю.

Таблиця 3.3 – Розрахунки робочої частоти на вихідному каналі СЧ

	f_p , МГц	$N_{\text{пзкд}}$	A	B
1 канал	199,9500	15996	-4	250
2 канал	199,9625	15997	-3	250
3 канал	199,9750	15998	-2	250
4 канал	199,9875	15999	-1	250
5 канал	200,0000	16000	0	250
6 канал	200,0125	16001	1	250
7 канал	200,0250	16002	2	250
8 канал	200,0375	16003	3	250
9 канал	200,0500	16004	4	250
10 канал	200,0625	16005	5	250

Параметри опорного генератора залежать від вибору каналу на якому від буде працювати. В даному проекті обрано 5 канал з частотою $f_p = 200$ МГц. Відповідно до характеристик синтезатора частоти MC145220 стабільність частоти складає 2,5% від вихідної частоти каналу [2].

3.3.1 Вихідний каскад радіопередавача – підсилювач потужності зонduючого радіолокаційного сигналу

Розрахунок параметрів підсилювача потужності було проведено в середовищі спеціального програмного забезпечення Transistor_Amp 1.1. Активним елементом був вибраний транзистор BFQ18A [7].

Таблиця 3.4 – Параметри транзистору

Максимальна робоча температура	175°C
Кількість виводів	3
Напруга колектор-емітер	18 В
Розсіювана потужність	1 Вт
Полярність транзистору	npr
Частота переходу	4 ГГц

Принципова електрична схема, що представлена на Рисунку 3.4 взята з книги [12]. Дана схема підсилювача передбачає ланцюг керування режимами роботи через зміщення робочої точки V_{BB} на вольт-амперній характеристиці транзистора для того, щоб стабілізувати роботу вихідного каскаду. Застосована стандартна схема включення з загальним емітером. Опір навантаження взято 50 Ом, живлення 25 В [7].

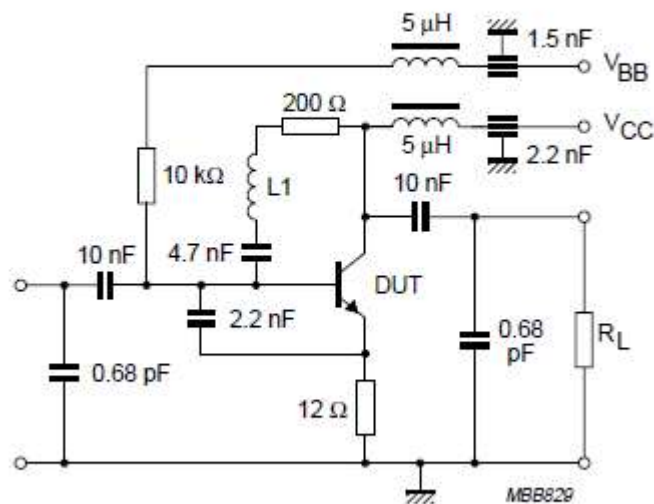


Рисунок 3.4 – Схема електрична принципова підсилювача потужності

В смузі частот ЗС підсилювач має забезпечувати коефіцієнт підсилення по потужності близько 11 дБ. Схема включення транзистору забезпечує лінійну АЧХ в смузі частот ЗС.

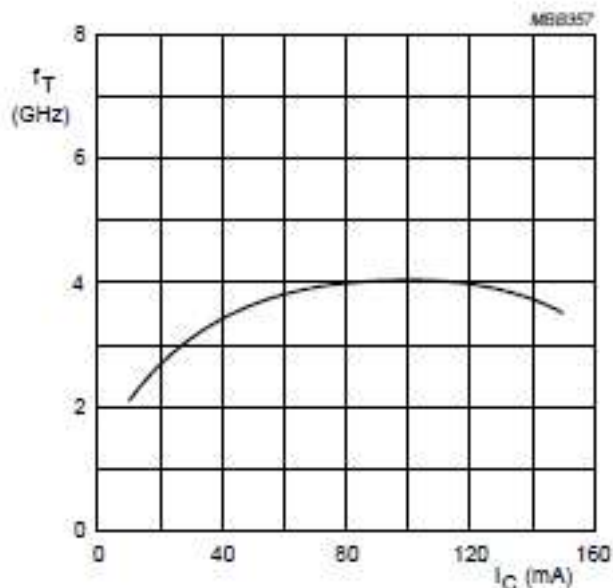


Рисунок 3.5 – Залежність частоти від току колектора

Запропонований підсилювач вихідного каскаду передавача РЛС задовольняє вимогам щодо стабільності роботи в діапазоні робочих частот 4 ГГц, має запас потужності більше 50%. Додатковий ланцюг керування забезпечує управління режимом роботи підсилювача.

3.4 Підсистема стабілізації напруги в блоці живлення радіолокаційної системи охорони периметру

Невід'ємною частиною будь-якого електронного пристрою є блок живлення. За основними своїми характеристиками, він повинен забезпечувати необхідний рівень вихідної напруги і струму, мати мінімальний рівень пульсацій, хороше відведення тепла і забезпечувати надійну роботу пристрою протягом тривалого часу.

Оскільки за призначенням передавача даний пристрій відноситься до стаціонарної апаратури, живлення буде відбуватися від мережі 220. Для даного передавача обрана безтрансформаторна схема живлення (імпульсний блок живлення), така схема має ряд суттєвих переваг.

Під час проектування пристрою особливу увагу необхідно приділити блоку живлення, який має бути досить надійним, оскільки може використовуватись на відкритому повітрі. Попри це він повинен бути

захищений від води, піску та прямих сонячних променів і звісно від механічних пошкоджень.

Вузли РЛС будуть живитися від постійної напруги 30 В. Визначимо орієнтовні потужності, які віддає джерело активному елементу (вузлу) РЛС:

$$P_{\Sigma} = 129,36 + 55,44 + 10,92 + 1,2 + 0,098 + 0,05 = 197,1 \text{ Вт} \quad (3.17)$$

Отже, джерело живлення повинне мати потужність 200 Вт [5].

Керуючий перетворювач напруги на накопичуючому дроселі L1 був зібраний на мікросхемі YX8018. Використання даної мікросхеми дозволило використовувати для живлення всього один елемент, а через конденсатор C2 та резистор R1 здійснюється зворотній зв'язок.

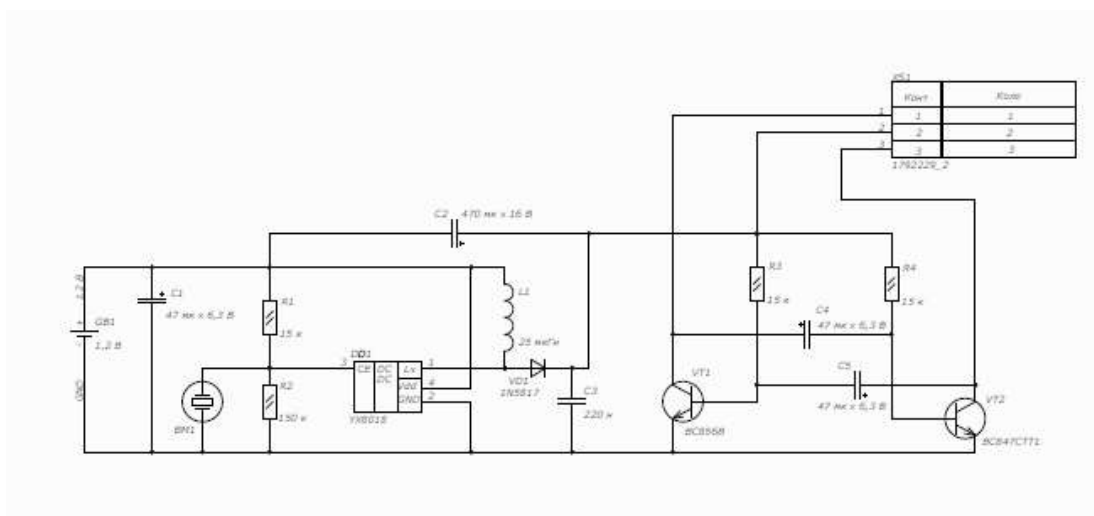


Рисунок 3.6 — Електрична схема блоку живлення

Мікросхема YX8018 має вхід керування CE, напруга на якому визначає працює перетворювач чи знаходиться в режимі очікування. У вихідному положенні перетворювач знаходиться в режимі очікування. При впливі на п'єзо-елемент BM1 на ньому виникає імпульс напруги, який запускає перетворювач напруги на мікросхемі DA1. Імпульс напруги, що виникають на дроселі, випрямляє діод VD1. Одночасно постійна напруга через резистор R1 та конденсатор C2 поступає на керуючий вхід CE мікросхеми DA1. Поки конденсатор C2 заряджається, перетворювач напруги знаходиться в робочому режимі [5].

Плата ламінована з обох сторін мідною фольгою товщиною 35 мкм. В якості діелектричного матеріалу виступатимуть листи з склотканини,

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\xi^2)} = \frac{3,02 \cdot 10^{10} \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^3}{12(1-0,42^2)} = 10,31 \text{ H}_M \quad (3.20)$$

					$12(1-5-)$ $12(1-0,42-)$	Лист
					PT71.464532.001 ПЗ	39
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначаємо значення функції $\varphi(\beta)$ для кріплення плати в чотирьох точках:

$$\varphi(\beta) = \pi^2 * \sqrt{\frac{1+1,621*\frac{\xi}{\beta}+\frac{1}{\beta^2}}{1+1,621*\frac{\xi}{\beta^3}+\frac{1}{\beta^6}}} = \pi * \sqrt{\frac{1+1,621*\frac{\xi}{1,429}+\frac{1}{1,429^2}}{1+1,621*\frac{1}{1,429^3}+\frac{1}{1,429^6}}} = 10,7 \quad (3.21)$$

де $\beta = \frac{a}{b} = 1.429$ – коефіцієнт, залежний від співвідношення довжини і ширини плати;

ξ – коефіцієнт Пуассона [6].

Визначимо значення резонансної частоти плати:

$$f_0 = \frac{\varphi(\beta)}{2*\pi*a^2} \sqrt{\frac{D}{m}} = \frac{10,1}{2*\pi*0,05^2} * \sqrt{\frac{10,31}{7,85}} = 651 \text{ Гц} \quad (3.22)$$

Так як резонансна частота плати $f_0 = 651$ Гц, що в кілька разів перевищує максимальну частоту вібраційних впливів (70 Гц), то обраний варіант кріплення плати влаштовує вимоги віброміцності.

Розрахуємо імовірність безвідмовної роботи $P(x)$ для DN-розподілу:

$$P(x) = 0.5 \left\{ \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{1-x}{v \sqrt{2x}} \right) \right] + e^{\frac{2}{v^2}} \left[1 + \operatorname{erf} \left(-\frac{1+x}{v \sqrt{2x}} \right) \right] \right\}, \quad (3.23)$$

де $P(x)$ – ймовірність безвідмовної роботи;

$\operatorname{erf}(x)$ – функція інтеграла помилок;

v – коефіцієнт варіації ($v = 1$).

$$\lambda_p = \lambda_0 K_1 K_2 K_3, \quad (3.24)$$

де λ_p – інтенсивність відмов ЕРЕ;

λ_0 – середньостатистична інтенсивність відмов ЕРЕ;

K_1 – функція температури та коефіцієнта навантаження;

K_2 – рівень механічних експлуатаційних впливів(вібрацій та ударів);

K_3 – відносна вологість у внутрішньому об'ємі РЕА [6].

Розрахунки починаємо з визначення розрахункової інтенсивності ЕРЕ

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						40
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата		

λ_p , далі визначаємо середній наробіток до відмови:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{T_0}{2\pi t_b^3}} \exp \left[-\frac{(t_b - T_0)^2}{2t_b T_0} \right], \quad (3.25)$$

де T_0 – середній наробіток до відмови;

t_b – тривалість випробувань ($t_b = 3 \cdot 10^4$).

Визначивши T_0 приймають $\mu = T_0$ задають необхідний час роботи t , а показники надійності ЕРЕ визначають в залежності від параметра $x = t/\mu$ та коефіцієнта варіації v .

Визначимо інтенсивність відмов конденсаторів:

Керамічні, об'ємно-пористі танталові:

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p K_C, \quad (3.26)$$

де λ_0 взято з таблиці – [табл. 5.1, 10];

K_C – коефіцієнт, що враховує номінальну ємність та математичну модель розрахунку для окремих груп конденсаторів [табл. 5.1][10];

K_p – взято з таблиці – [табл. 5.1, 10].

Далі визначимо інтенсивність відмов транзисторів:

Біполярні:

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p K_\Phi K_{S1}, \quad (3.27)$$

де λ_0 взято з таблиці – [табл. 5.1, 10];

K_p взято з таблиці – [табл. 5.1, 10];

K_Φ взято з таблиці – [табл. 5.1, 10];

K_{S1} взято з таблиці – [табл. 5.1, 10].

Також, визначимо інтенсивність відмов резисторів:

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p K_R, \quad (3.28)$$

де λ_0 взято з таблиці – [табл. 5.1, 10];

K_R – коефіцієнт, що враховує номінальний опір – [табл. 5.1, 10].

Розрахуємо інтенсивність відмови мікросхеми:

$$\lambda_p = \lambda_0 K_{C,T} K_{\text{корп}}, \quad (3.29)$$

де λ_0 взято з таблиці – [табл. 5.2, 10];

$K_{с,т}$ – коефіцієнт режиму, що враховує складність інтегральних мікросхем та температуру навколишнього середовища – [табл. 5.2, 10];

K_U – коефіцієнт, що враховує вплив максимальних значень напруги живлення, $K_U = 1$

$K_{корп}$ – коефіцієнт, що враховує вплив матеріалу корпусу інтегральних мікросхем ($K_{корп} = 3$, для пластмасових корпусів)

Результати розрахунків зведено в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Розрахунки відмов елементів

Назва компоненту	$\lambda_0, 10^6 \frac{1}{\text{год}}$	K_1	K_2	K_3	N, шт.	$\lambda_p, 10^6 \frac{1}{\text{год}}$
Підсилювачі	0,019	0,6	0,9	1	1	0,01
Конденсатори	0,019	0,362	1,59	-	5	0,5
Резистори Від 1 кОм до 100 кОм	0,05	0,7	0,58	-	3	0,063
Резистори Від 100 кОм до 1МОм	0,05	1	0,58	-	1	0,017
Транзистори	0,06	0,93	0,7	-	2	0,078
Діоди	0,034	0,1486	1,5	0,8	1	0,006

Визначимо із таблиці сумарну інтенсивність відмов схеми:

$$\lambda_{\Sigma p} = 0.674 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{год}} \quad (3.30)$$

Визначене значення $T_0 \approx 42000$ годин.

Для підтвердження розрахунків побудуємо графік залежності часу роботи пристрою від ймовірності безвідмовної роботи.

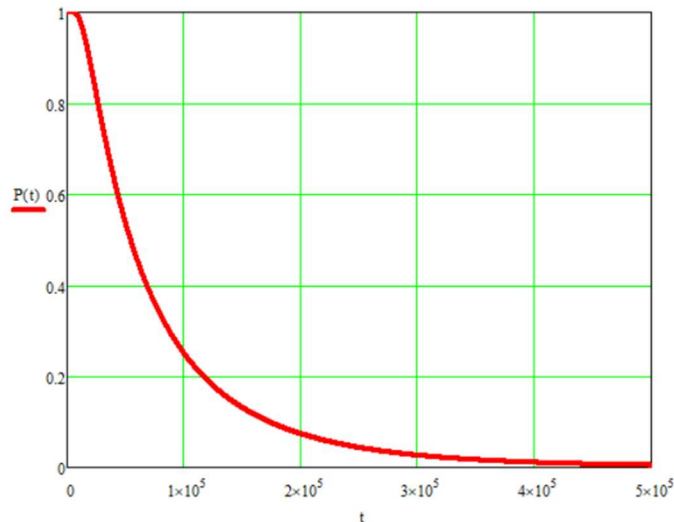


Рисунок 3.9 — Графік функції ймовірності безвідмовної роботи

Отже, час безвідмовної роботи – 8760 годин, а сумарна ймовірність безвідмовної роботи при ($t = 8760$ год): $P = 95\%$ [6].

Корпус для пристрою виконаний з ABS пластику. На рисунку він білого кольору, але варто використати темні кольори, або кольори навколишнього середовища, оскільки прилад буде використовуватись в охоронних цілях.

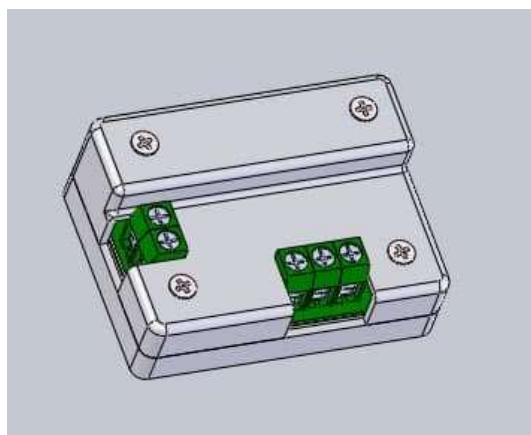


Рисунок 3.10 — Тривимірна модель пристрою

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата

PT71.464532.001 ПЗ

Лист
43

Плата кріпиться в корпус за допомогою 4 саморізів, що зображено на Рисунку 3.11.

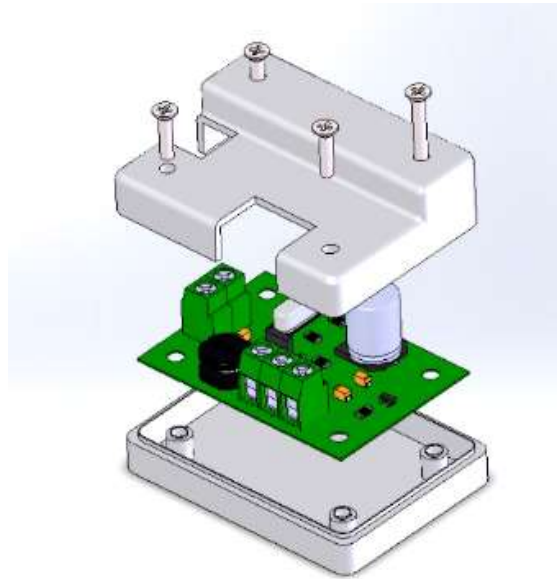


Рисунок 3.11 — Тривимірна збірка корпусу

Отже, було визначено призначення пристрою, його функції та особливості середовища, в якому він буде використовуватися.

Пристрій був зібраний з використанням мікросхеми YX8018, яка виступає у ролі перетворювача напруги.

За допомогою системи автоматизованого проектування Altium Designer було розроблено односторонню друковану плату розміром 35мм x 50 мм. Корпус було розроблено в середовищі SolidWorks. В якості матеріалу було вибрано пластик білого кольору. Результати розрахунків резонансної частоти показали, що пристрій можна транспортувати у різноманітних засобах з частотою 651 Гц.

					PT71.464532.001 ПЗ	Лист
						44
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Дипломний проект виконаний на актуальну тему, щодо розробки радіолокаційної системи охорони периметру зони контролю важливих об'єктів від несанкціонованого доступу в складних погодних умовах.

Під час виконання дипломного проекту розглянутий досвід побудови радіолокаційних системи малої дальності охорони периметру, проаналізована класифікація радіолокаційних систем за їх призначенням та особливостями побудови і роботи.

За результатами проведеного аналізу досвіду розробки РЛС для охорони периметру було визначено, що доцільно здійснювати огляд смуги контролю без сканування. Побудова охоронного периметру повинна забезпечити взаємну охорону РЛС одна одної. Охоронний периметр повинен бути завжди замкнутий. Радіолокаційні системи повинні бути прості, надійні та мало коштувати.

Було здійснено порівняння сигналів спеціальної форми, що застосовуються в РЛС та визначено, що для РЛС охорони периметру є достатнім застосування радіоімпульсу прямокутної форми, але частота повторення сигналу повинна бути досить великою, щоб забезпечити накопичування відбитих сигналів та підвищити імовірність виявлення.

Розроблено структурну схему, яка має типову конфігурацію однопозиційної РЛС малої дальності. Визначені основні параметри радіолокаційної системи, такі як довжина імпульсу, частота повторення, потужність зондуючого сигналу, необхідне відношення сигнал/шум для надійного виявлення цілі.

Проведені розрахунки параметрів антенної системи РЛС, синтезатора частоти опорного сигналу та розроблено односторонню плату і корпус для підсистеми стабілізації напруги блоку живлення РЛС.

За сукупністю отриманих результатів можна вважати, що робота виконана в повному обсязі, мета дипломного проекту досягнута.

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						45
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975.
3. Ширман Я.Д., Лосев Ю.И., Минервин Н.Н., Москвитин С.В., Горшков С.А., Леховицкий Д.И., Левченко Л.С. Радиоэлектронные системы: основы построения и теории. – М.: Справочник, 1998 – 828 с.
4. Ямпурин Н.П. Основы надёжности электронных средств. – М.: Справочник, 2010.
5. Варламов Р.Г. Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования. – М.: Советское радио, 1980.
6. Особливості проектування друкованих плат [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
https://docs.google.com/presentation/d/1QzFnYZemYc_4rnoVazhtr8hZXq7G8FD8/edit#slide=id.p1/
7. The common-emitter circuit [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<https://www.transistoramp.de/en/common-emitter-circuit/>
8. Grundlagen der Radartechnik [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<https://www.radartutorial.eu>
9. Pulsed vs. CW Signals: Both Loom on a Designer's Radar [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21849213/pulsed-vs-cw-signals-both-loom-on-a-designers-radar>
10. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств, 2010
11. Сиверс А.П., Суслов Н.А., Метельский В.И. Основы радиолокации. – М.: Справочник, 1959.
12. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. – М.: Радио и связь, 1983.

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						46
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дата		

13. Быховский М.А. Зарождение и развитие радиолокационной техники – М.: Справочник, 2017 – 194 с.
14. Вербa В.С Радиолокация для всех, 2020 – 504 с.
15. Щелкунов С.А., Фриис Г.Т. Антенны: Теория и практика. – М.: Советское радио, 1955 – 604 с.
16. Пистолькорс А.А, Антенны, 1947 – 480 с.
17. Расчёт рупорной антенны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://3g-aerial.biz/onlajn-raschety/raschety-antenn/horn-antenna-calculator>
18. Свистов В.М., Радиолокационные сигналы и их обработка. – М.: Советское радио, 1977 – 448 с.

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

ДОДАТОК А

					РТ71.464532.001 ПЗ	Лист
						48
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

					PT71.464532.001 ПЗ	Лист
						49
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		