МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА АВІОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____Ю.В. Грищенко
«___»_____2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР

ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

Тема: «Система запобігання зіткнень сучасного повітряного судна»

Виконавець:_____Волошко Анастасія Олегівна_____

(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: _____к.т.н., доц. Чужа Олексій Олексійович_____

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант розділу «Охорона праці»: _____ Козлітін О.О.
(підпис) (прізвище, ім'я, по-батькові)

Консультант розділу «Охорона навколишнього середовища»: _____ Черняк Л.М.
(підпис) (прізвище, ім'я, по-батькові)

Нормоконтролер: _____ В.В. Левківський
(підпис) (П.І.Б.)

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрям (спеціальність) 173 «Авіоніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Ю.В.Грищенко

«___» _____ 2023 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання кваліфікаційної роботи

Волошко Анастасія Олегівна

1. Тема роботи: «Система запобігання зіткнень сучасного повітряного судна», затверджена наказом ректора від «05» жовтня 2023р. № 2040/ст.

2. Термін виконання роботи: з 02 жовтня 2023 по 31 грудня 2023.

3. Вихідні дані роботи: небезпека зіткнень літаків у повітряному просторі, сигналізатори небезпечних зближень, системи попередження зіткнень, літаковий відповідач КПР, датчики технічного огляду повітряного простору.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

Дані небезпечних зближень і зіткнень літаків з об’єктами у повітрі. Методи та засоби усунення загрози зіткнень. Дослідження датчиків технічного огляду повітряного простору. Інфрачервоні датчики виявлення небезпечних об’єктів під час польоту.

5. Перелік обов’язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: таблиці, рисунки.

6. Календарний план-графік

№ пп	Етапи виконання роботи	Термін виконання етапів	Відмітка про виконання
1.	Підбір літератури	02-16.10.2023	
2.	Підготовка та написання розділу 1 «Загальна характеристика небезпечних повітряних об'єктів і систем запобігання зіткнень»	17-31.10.2023	
3.	Підготовка та написання розділу 2 «Дослідження датчиків технічного огляду повітряного простору»	01-15.11.2023	
4.	Підготовка та написання розділу 3 «Інфрачервоні датчики виявлення небезпечних об’єктів під час польоту»	16-30.11.2023	
5.	Підготовка та написання розділу 4 «Охорона праці»	01-07.12.2023	
6.	Підготовка та написання розділу 5 «Охорона навколишнього середовища»	07-14.12.2023	
7.	Перевірка на плагіат, оформлення та отримання рецензії	15-16.12.2023	
8.	Підготовка презентації та доповіді	17-20.12.2023	

7. Консультанти з окремих розділів

Назва розділу	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	ст. викл. Козлітін О.О.		
Охорона навколишнього середовища	к.т.н. доцент Черняк Л.М.		

8. Дата видачі завдання «02» _жовтня_ 2023 р.

Керівник дипломної роботи Чужа О.О.

Завдання прийняла до виконання Волошко А.О.

РЕФЕРАТ

Загальний обсяг пояснювальної записки до дипломної роботи на тему

«Система запобігання зіткнень сучасного повітряного судна» складає 95 сторінок, 40 рисунків, 6 таблиць, 24 використаних джерел.

НЕБЕЗПЕЧНІ ЗІТКНЕННЯ, ІНФРАЧЕРВОНІ ДАТЧИКИ, ТЕХНІЧНИЙ ОГЛЯД, СИСТЕМИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ, ЛІТАКОВИЙ ВІДПОВІДАЧ КПР

Об’єкт дослідження: процес дослідження системи запобігання зіткнень сучасного повітряного судна.

Предмет дослідження: система запобігання зіткнень сучасного повітряного судна.

Мета роботи: дослідити систему запобігання зіткнень сучасного повітряного судна, з урахуванням особливостей його експлуатації.

Методи дослідження: оцінка небезпеки зіткнень, аналіз системи запобігання зіткнень сучасного повітряного судна, обробка літературних джерел.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ 6

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1 10

ОЦІНКА НЕБЕЗПЕКИ ЗІТКНЕНЬ ЛІТАКІВ У ПОВІТРІ 10

1.1. Небезпека зіткнень ЛА у повітряному просторі 10

1.2. Аналіз систем запобігання зіткненням повітряних суден 12

1.2.1. Системи TCAS запобігання зіткненням 13

1.2.2. Система попередження зіткнень БПЛА 21

1.2.3. Проблема з безпекою польотів у відношенні до птахів 25

1.3. Технічні системи захисту повітряного простору аеропортів 28

РОЗДІЛ 2 34

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОГЛЯДУ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ 34

2.1. Аналіз датчиків технічного зору систем огляду повітряного простору . 34

2.2. Інфрачервоне випромінювання повітряних об'єктів 42

2.2.1. Основні закони ІЧ випромінювання 43

2.2.2. Інфрачервоне випромінювання повітряних суден із тепловими двигунами 45

2.3. Вплив атмосферних перешкод на розповсюдження інфрачервоного випромінювання 47

3 РОЗДІЛ 50

ІНФРАЧЕРВОНІ ДАТЧИКИ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ПІД ЧАС ПОЛЬОТУ 50

3.1. Лазерний нагрів матеріалів 50

3.2. Вплив теплового ефекту на фізичні властивості матеріалів 53

3.3. Теплове випромінювання безпілотних літальних апаратів 56

3.4. Розрахунок теплового випромінювання квадрокоптера 62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ЛА – літальний апарат

СРППЗ – система раннього попередження приближення землі

ОСЛ – обчислювальна система літаководіння

РЛС – радіолокаційна станція

ПС - повітряне судно

ІСАО – міжнародна організація цивільної авіації

СППЗ – система попередження приближення землі

ССНЗ – система сигналізації небезпечного зближення

ЗПС – злітно-посадкова смуга

РУД – ручка управління двигунами

УПР – управління повітряним рухом

РМС – радіомаякова система

ІКВШП – інформаційний комплекс висотно-швидкісних параметрів

ВСТУП

Актуальність систем запобігання зіткнень для сучасної авіації зростає з кожним роком. Це пов'язано зі збільшенням інтенсивності повітряного руху, появою нових типів повітряних суден, таких як дрони та безпілотники, а також ускладненням загальної повітряної обстановки.

За останні 10 років кількість авіарейсів зросла більш ніж на 30%, а разом з тим збільшилася і кількість потенційно небезпечних зближень повітряних суден. За статистикою ІСАО, щорічно фіксується понад 1000 серйозних інцидентів, пов’язаних з недотриманням екіпажами чи диспетчерами вимог щодо ешелонування. Це загрожує безпеці польотів та призводить до значних економічних втрат авіакомпаній в разі вимушених затримок чи відвернень рейсів.

Водночас стрімко зростає кількість малих безпілотних літальних апаратів приватного та комерційного використання. За прогнозами аналітиків, до 2035 року у світі буде понад 7 млн. дронів. Ці літальні об’єкти масою від декількох грамів до 25 кг надзвичайно складно фіксувати органами КПР, а їх раптова поява може бути критичною на етапах зльоту та посадки літака, призвести до пошкодження його конструкції та відмови критичних систем. Як наслідок - до авіакатастроф.

Виходячи з цих чинників, питання оснащення літаків надійними та ефективними бортовими комплексами моніторингу повітряної обстановки та запобігання можливих зіткнень є надзвичайно актуальним та стратегічно важливим напрямком розвитку галузі.

Принцип дії сучасних систем типу TCAS ґрунтується на інтегрованій обробці даних від різних типів датчиків та автоматичному видачі попереджень або рекомендованих маневрів для екіпажу.

Перший рівень - радіолокаційні датчики (активні та пасивні), що взаємодіють з наземними станціями організації повітряного руху. Вони використовують відбиті радіосигнали від транспондерів інших літаків (режими A, C, S) та наземних маяків для визначення їх точного місцеположення, швидкості та азимуту відносно даного ПС. На основі цих параметрів розраховується траєкторія польоту об'єктів та ймовірність зближення з їх маршрутом. Однак такі системи не здатні виявляти безпілотники, птахів тощо.

Тому для комплексної оцінки обстановки задіють оптико-електронні системи технічного зору з високочутливими телекамерами. Вони фіксують зображення у видимому та інфрачервоному діапазонах, на яких за допомогою потужних алгоритмів комп'ютерного зору виявляються повітряні об'єкти, класифікуються за розмірами та швидкістю. Далі відбувається стеження за кожним з них та автоматичне оповіщення пілотів у разі загрози зіткнення, навіть якщо це птах або дрон.

Додатково застосовують радіотеплові датчики. Вони здатні фіксувати джерела теплового випромінювання (двигуни літаків, їх нагрітий фюзеляж) на різних частотах. Це доповнює "комплексну картину" повітряної обстановки та можливих ризиків.

Отримані численні дані з різних датчиків обробляються обчислювальним ядром системи запобігання зіткнень. Воно зіставляє їх між собою, аналізує та моделює траєкторії та можливі колізії з урахуванням динаміки самого літального апарату (його курсу, висоти, швидкості). Таким чином формується максимально точна та оперативна картина поточної повітряної обстановки навколо літака в режимі реального часу.

У випадку, якщо система розпізнає високу загрозу зіткнення з повітряним об'єктом на шляху - вона автоматично видає попереджувальні візуальні сигнали в кабіні та голосові повідомлення з рекомендованими діями для пілотів. Це можуть бути коригування висоти, швидкості, курсу для уникнення колізії. Завдяки такому комплексному підходу ймовірність нещасних випадків мінімізується.

До перспектив подальшого розвитку таких систем слід віднести їх інтеграцію з технологіями штучного інтелекту. Це дозволить розширити функціонал за рахунок автономного «інтелектуального» аналізу повітряного простору в реальному часі та прийняття рішень щодо оптимальних маневрів ухилення без участі людини-пілота.

Отже, удосконалення та впровадження найсучасніших систем виявлення повітряних об'єктів і запобігання можливих зіткнень є вкрай необхідним для гарантування безпеки польотів за умов постійного зростання інтенсивності повітряного руху.

РОЗДІЛ 1

ОЦІНКА НЕБЕЗПЕКИ ЗІТКНЕНЬ ЛІТАКІВ У ПОВІТРІ

1.1. Небезпека зіткнень ЛА у повітряному просторі

Протягом останніх років, за даними Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО), кількість авіаційних катастроф постійно зменшується. Це свідчить про підвищення надійності авіаційної техніки та ефективну діяльність служб керування повітряним рухом. Однак існують фактори, які не дозволяють повністю уникнути аварійних ситуацій у повітряному просторі. До основних з них відносяться:

- висока інтенсивність повітряного руху, коли повітряний простір заповнений літальними апаратами різних класів, починаючи від великих авіалайнерів до невеликих літаків.
- людський фактор, тобто помилки персоналу служб керування повітряним рухом і екіпажів.
- несприятливі погодні умови.
- Зіткнення літальних апаратів в повітрі та на злітно-посадкових смугах із іншими літальними апаратами та транспортними засобами.
- Відсутність на борту автономних систем запобігання зіткнень.

Ці чинники спричиняють найбільшу кількість аварій у повітрі, тому особливо важливою стає кількісна оцінка безпеки польоту, яка виражається у визначенні допустимого ризику зіткнень повітряних суден між собою.

Ризик зіткнень (позначений як Q) повітряних суден залежить від ймовірності правильного визначення місця розташування літального апарата за допомогою навігаційної апаратури ($P_{\text{НАВ}}$) і ймовірності вірного контролю польоту за допомогою систем управління повітряним рухом ($P_{\text{КПР}}$):

$$Q = (1 - P_{\text{НАВ}})^2 (1 - P_{\text{КПР}})^2$$

Проте навіть використання високоефективних та надійних систем управління повітряним рухом не може забезпечити повну безпеку польотів, оскільки частина поверхні Землі не покрита зоною функціонування таких систем. Крім того, існуючі системи управління повітряним рухом не можуть надійно контролювати польоти на малих висотах та в важкодоступних для спостереження районах. Саме тому ще у

1977 році була доведена технічна та економічна доцільність встановлення на повітряних суднах спеціальних автономних систем запобігання зіткнень (СПЗ). Ці системи мають незалежно від систем управління повітряним рухом попереджувати екіпаж повітряного судна про можливу небезпеку зіткнення з іншим літальним апаратом або наземною перешкодою. З наявністю на борту таких систем ризик зіткнення різко знижується, ставши мінімальним:

$$Q = (1 - P_{\text{НАВ}})^2 (1 - P_{\text{КПР}})^2 (1 - P_{\text{СПЗ}})^2$$

де $P_{\text{СПЗ}}$ – ймовірність правильного виявлення небезпеки бортовою СПЗ.

При аналізі проблеми уникнення зіткнень повітряних суден з іншими об’єктами у повітрі розрізняють два поняття: небезпечне наближення та зіткнення.

Небезпечне наближення виникає у випадках, коли літальні апарати наближаються на таку мінімальну відстань, на якій можна уникнути зіткнення шляхом виконання маневрів ухилення.

Зіткнення має місце, коли літальні апарати наближаються на відстань, яка дорівнює або менше відстані безпечного розходження. Безпечна відстань (дистанція) визначає окрему зону безпеки - конкретний повітряний простір навколо кожного літального апарату, в яку не повинен входити інший літак, щоб уникнути можливого зіткнення. Ця зона безпеки залежить від маси, розмірів, технічних параметрів літального апарату, умов його польоту та інших факторів.

Ураховуючи те, що вертикальна швидкість руху повітряних суден значно менша, ніж горизонтальна, зона безпеки може бути представлена у формі циліндра з круглим перетином у горизонтальній площині (рис.1.1).

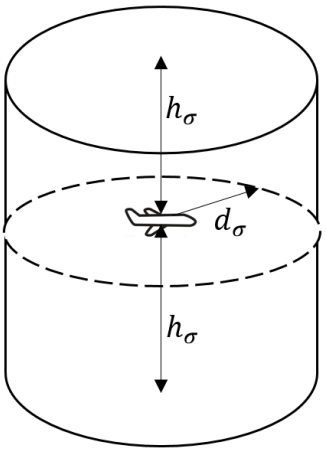


Рис. 1.1. Зона безпеки

Для забезпечення безпеки польоту відстань d(t) і висота h(t) між літаками у будь-який момент часу t мають дотримуватись умов:

$$d(t) \geq d_\sigma; \qquad h(t) \geq h_\sigma, \tag{1.1}$$

де d_σ – радіус зони безпеки; h_σ – половина висота зони безпеки.

Для уникнення зіткнень повітряних суден, важливо уникати небезпечних зближень між ними, тобто виконувати нерівності:

$$d(t_\text{м}) \geq d_\sigma; \qquad h(t_\text{м}) \geq h_\sigma,$$

де $t_\text{м}$ - час, необхідний на маневр ухилення; $d(t_\text{м}), h(t_\text{м})$ - безпечна відстань і висота через проміжок часу $t_\text{м}$.

Отже, для оцінки ризику зіткнення повітряних суден у площині горизонту вистачає визначення часу $(t_\text{м})$, необхідного для виконання маневру ухилення від зіткнення, за допомогою приладів системи попередження зіткнень. Таким чином, всі сучасні види літальних апаратів мають бути обладнані такими системами, які взаємодіють між собою та відповідають вимогам ІКАО, враховуючи параметри їхньої маси та розмірів.

1.2. Аналіз систем запобігання зіткненням повітряних суден

При аналізі проблеми запобігання зіткнень повітряних суден з іншими об'єктами у повітрі, можна виокремити кілька розповсюджених випадків, коли можуть виникати небезпечні наближення та зіткнення літаків з різними об'єктами:

- Небезпечні зближення з іншими повітряними апаратами, обладнаними системами попередження зіткнень (СПЗ).
- Небезпечні зближення або зіткнення з безпілотними літальними апаратами (БПЛА).
- Небезпечні зіткнення з птахами (орнітологічна небезпека).

На сьогоднішній день основною системою, що забезпечує попередження зіткнень літаків у повітрі, є TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System), яка є автономною бортовою системою, сертифікованою ICAO. TCAS призначена для допомоги екіпажам у запобіганні зіткнень у повітряному просторі. У відповідному стані TCAS є захистом від зіткнень з іншими літаками, які мають активні та відповідні до стандартів ІКАО радіолокаційні відповідачі. При відсутності або

непрацездатності засобів обміну навігаційної інформації (відповідачів ATC-RBS або ADS-B) системи попередження зіткнень не зможуть виявляти інші ПС, що збільшує ризик небезпечних наближень та зіткнень.

Сьогодні увага всесвітньої громадськості зосереджена на розробці безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Ці сучасні системи є складними функціональними структурами, які використовують передові технології у мікроелектроніці, програмуванні, високоефективних двигунах, композитних матеріалах тощо. Однак, на відміну від покращення льотних характеристик, розвиток БПЛА враховує його безпеку, забезпечуючи високий рівень льотного ресурсу та удосконалену інтелектуальну систему управління. Безпека повітряного руху вимагає збереження життя та безпечності для будь-яких літальних апаратів. Критерієм безпеки є ризик зіткнень між повітряними суднами, тому найважливіше місце у системі управління повітряним рухом належить виявленню потенційно небезпечних ситуацій.

Проблема зіткнень з птахами є однією з найактуальніших у сучасних дослідженнях. Орнітологічна безпека польотів - це особливий тип безпеки повітряних перевезень, спрямований на зменшення впливу птахів на авіацію. Ця сучасна система включає заходи для захисту повітряних суден від птахів, трансформацію аеродромів та їхніх територій для зменшення привабливості для птахів, ведення обліку та розслідування випадків зіткнень, а також організаційні заходи безпеки аеропортів. Уникнення зіткнень з птахами - це складна проблема, яка стала актуальною від самого народження авіації і залишається невирішеною до цього часу.

1.2.1. Системи TCAS запобігання зіткненням

Проблема зіткнень повітряних суден у повітрі виявилася наочною ще у 50-х роках минулого століття. Після серії авіаційних катастроф з численними жертвами, Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO) розробила концепцію та міжнародні стандарти для Бортової системи попередження зіткнень (ACAS - Airborne Collision Avoidance System). Однією з основних розробок, що найбільше

розповсюдились відповідно до цієї концепції, є система TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System).

TCAS представляє собою автономну бортову систему, сертифіковану ІКАО, що призначена для допомоги екіпажам у запобіганні зіткнень у повітряному просторі. В режимі активації, TCAS стає додатковим захистом від зіткнень з іншими літаками, на яких працюють і функціонують відповідні радіолокаційні відповідачі системи контролю повітряного руху (КПР) або в режимі "S". Однак цей захист не активується, якщо відповідний відповідач системи не відповідає стандартам ІКАО.

Система працює на основі активної радіолокації в автономному режимі, незалежно від будь-якого бортового навігаційного обладнання та наземних систем. TCAS контролює навколишні ПС, використовуючи запити до їх відповідачів, та оцінює ризик зіткнення. Вона запитує всі судна, що перебувають поруч з "власним" літаком. Якщо відповідач «іншого» судна працює в режимі «А», TCAS отримує лише інформацію про відстань і напрямок літака; якщо він працює в режимі «С», додатково передається інформація про висоту; а в режимі «S» "власний" та "інший" літак обмінюються даними для взаємної координації, таких як рекомендації зі зміни вертикальної швидкості та мовні повідомлення через гучномовець та авіагарнітуру пілотів у випадку небезпечних ситуацій. На сьогоднішній день існують декілька модифікацій системи, основними з яких є TCAS I та TCAS II у версіях: 6.04, 7.0, 7.1.

Принцип роботи системи TCAS полягає у створенні захисної ділянки повітряного простору навколо літака, що складається з двох частин: зони попередження *«Warning Area»* та зони підвищеної уваги *«Caution Area»* (рис. 1.2). Розміри цих зон змінюються в залежності від висоти та швидкості польоту. Система забезпечує захист цих зон від вторгнень інших ПС, враховуючи їх швидкість наближення як за відстанню, так і за висотою.

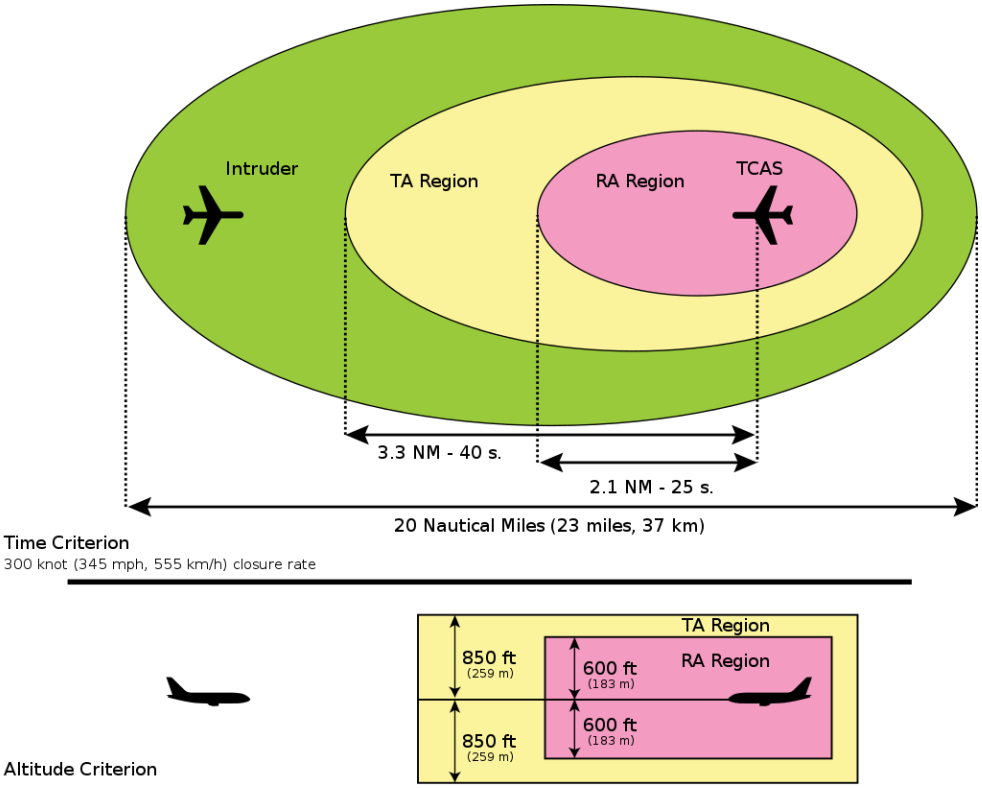


Рис. 1.2. Зони дії TCAS.

TCAS регулярно передає через всеспрямовану антену хаотичний сигнал на частоті 1090 МГц (рис. 1.3) та безперервно стежить за повітряним простором навколо «свого» літака ПС1, фіксуючи сигнали відповідачів інших ПС. Якщо «чужий» літак ПС2 з TCAS потрапляє в захисну зону, він реєструє цей сигнал і у відповідь передає свій на частоті 1030 МГц.

Так відбувається радіообмін даними між літаками. У результаті, з урахуванням інформації від наземної станції, визначаються відстань між ПС, їх радіальна швидкість та висота. На основі цього складається прогноз траєкторії та видаються команди щодо узгоджених маневрів для запобігання зіткненню.

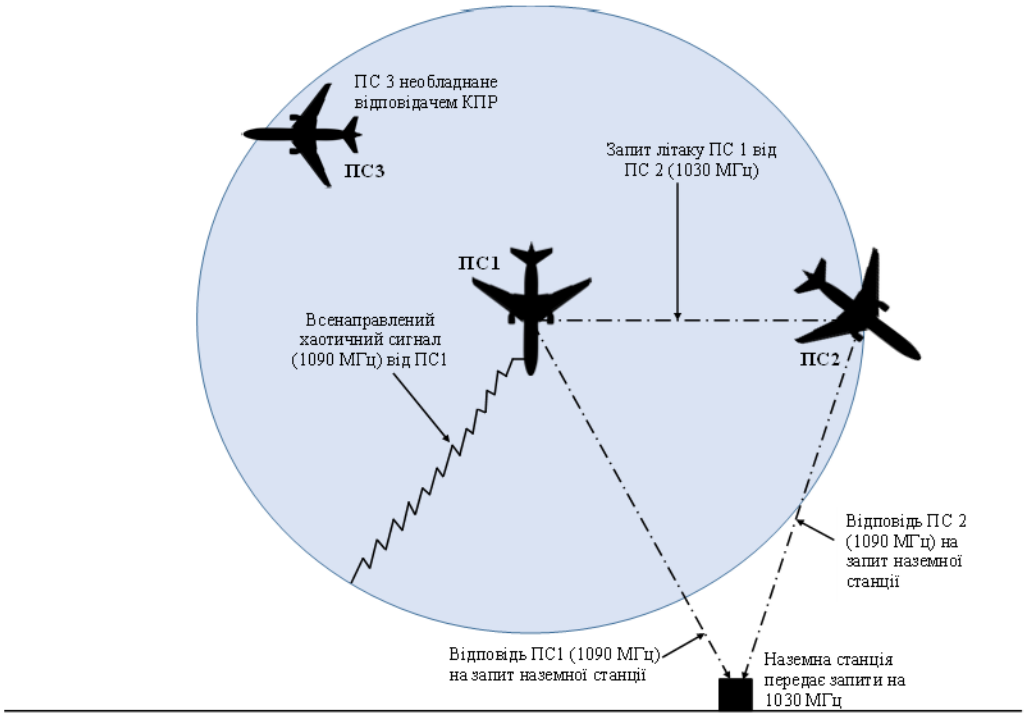


Рис. 1.3. Типова схема принципу дії TCAS.

Система TCAS працює за принципом розрахунку часу до можливого зіткнення «τ». Це означає, що незалежно від геометрії траєкторій конфліктуючих літаків в даний момент часу екіпажу видається попередження про повітряну обстановку *(TA)* та рекомендації з усунення конфліктної ситуації *(RA)* з однаковим заступом по часу.

Попередження про повітряну обстановку *(режим TA)* активується при виявленні конфліктуючого літака, для якого прогнозується, що йому потрібно від 20 до 48 секунд, щоб потрапити в захищену зону зіткнення, передбачену системою TCAS.

Фактична відстань на момент видачі попередження змінюється через залежність від швидкості зближення та висоти польоту конфліктуючого літака. Звукове повідомлення TA активується словами *«TRAFFIC, TRAFFIC»* (повітряний об'єкт, повітряний об'єкт). Відображення такого літака на дисплеї *VSI/TRA* представлене у вигляді цілком бурштинового круга, розташованого на місці, що точно відображає відстань і напрямок цього літака, обладнаного системою TCAS (рис. 1.4).

Рис. 1.4. Індикація системи TCAS на дисплеї *VSI/TRA*

У прилеглому полі дані відображаються з використанням висотного поділу, що дозволяє визначити, чи знаходиться конфліктний літак вище чи нижче літака, обладнаного системою TCAS 2000. Крім того, присутня стрілка, спрямована вгору або вниз, яка інформує про напрямок вертикальної швидкості конфліктного літака, в разі коли вона перевищує 500 футів в хвилину.

Рекомендації щодо вирішення конфліктних ситуацій (TCAS режим RA)

Рекомендації щодо вирішення конфліктних ситуацій (TCAS режим RA) видаються для літаків, які перебувають у конфліктній ситуації та прогнозується, що їм знадобиться 15-35 секунд, щоб увійти в зону зіткнення, захищену системою TCAS. Фактична відстань на момент видання цих рекомендацій залежить від швидкості наближення та висоти польоту конфліктного літака.

У разі, якщо літак входить в зону попередження, система видаватиме рекомендацію RA, яка відображатиметься на дисплеї VSI/TRA у вигляді червоної дуги заборонених вертикальних швидкостей та зеленої дуги дозволених вертикальних швидкостей (див. рис. 1.5). Це супроводжується голосовим повідомленням.

Рис. 1.5. Відображення рекомендації на дисплеї *VSI/TRA*:

1 –заборонена вертикальна швидкість «червона вузька дуга»;

2 – задана вертикальна швидкість «зелена широка дуга»

Відмітка конфліктного літака відображається на дисплеї *VSI/TRA* у вигляді суцільного червоного квадрата, розміщеного в місці, що відповідає фактичній дальності та азимуту щодо літака з TCAS. У представленому інформаційному полі вказуються ті самі дані, що і у випадку попередження про повітряну обстановку (TA). Рекомендація *RA* може бути або коригувальною, або превентивною. Коригувальна рекомендація передбачає зміну вертикальної швидкості так, щоб стрілка індикатора покинула зону забороненої червоної дуги і увійшла в дозволену зелену дугу. Превентивна рекомендація обмежує вертикальну швидкість, щоб зберегти вертикальне рознесення, і відображається лише червоною дугою. Залежно від необхідних дій для вирішення конфлікту, рекомендації RA можуть бути посилені, послаблені або змінені на протилежні. Будь-які зміни супроводжуються голосовим і візуальним сповіщенням.

Апаратура TCAS складається з таких компонентів: всеспрямована нижня та спрямована верхня антени, що дозволяють визначати азимут і висоту літака, котрий відповідає на запити приймально-передавального пристрою; два відповідачі з двома антенами кожен і пультом керування (рис.1.6).

На обчислювальний блок TCAS (рис.1.7) надходять дані про радіовисоту, барометричну висоту, перебування в повітрі чи на землі, положення шасі, а також режими роботи з пульта управління.

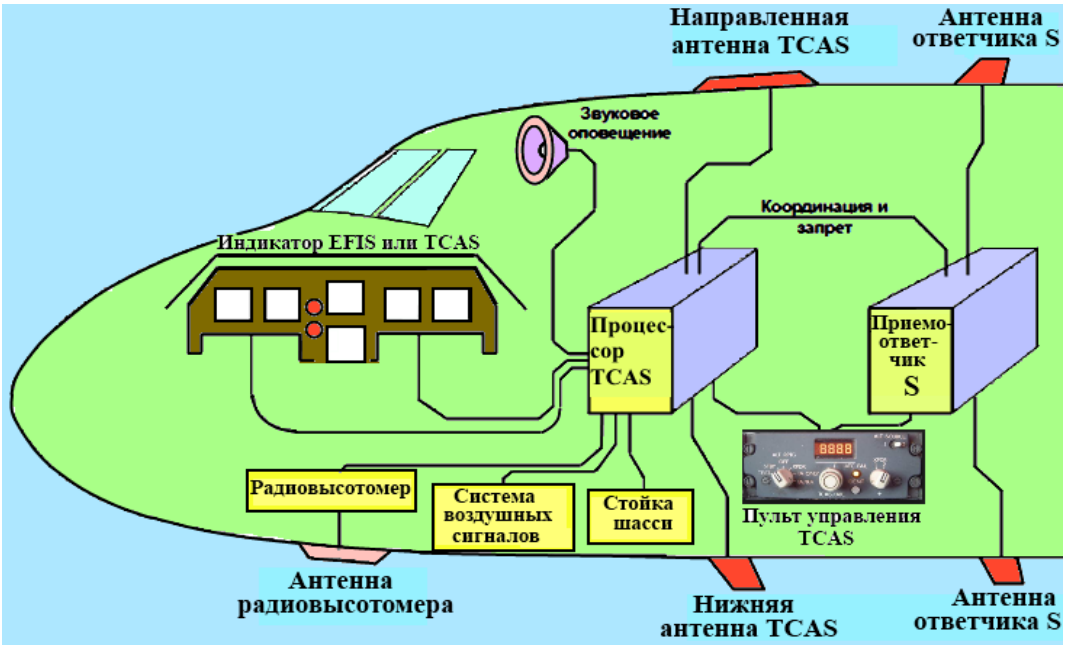


Рис. 1.6. Схема системи TCAS.

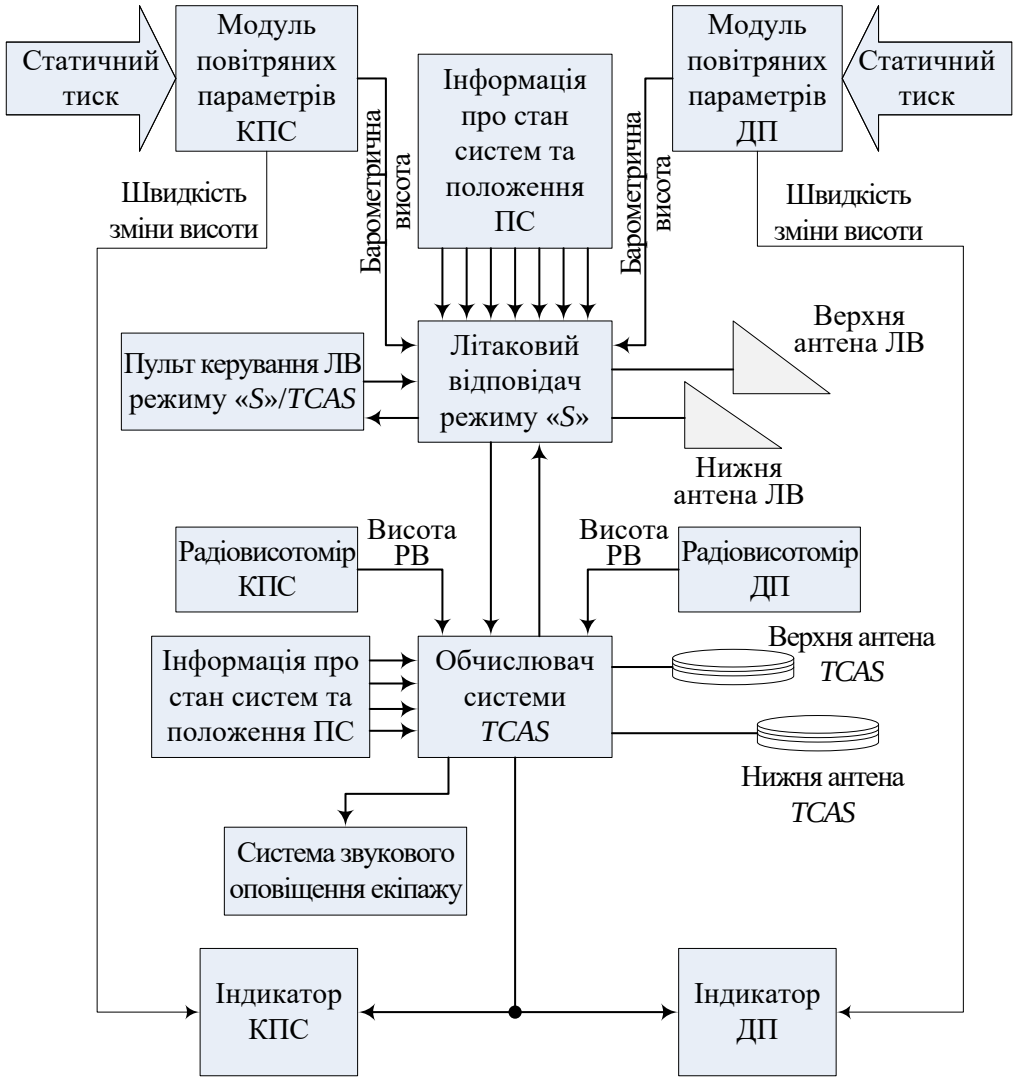


Рис. 1.7. Структурна схема TCAS 2000.

Обчислювальний блок системи TCAS взаємодіє з іншими літаками, з'ясовуючи їхнє місцезнаходження, відстежуючи траєкторії, надсилаючи різні попередження та рекомендації на екрани показників вертикальної швидкості та інших індикаторів у кабіні, а також передаючи голосові повідомлення пілотам через систему звукового сигналу. Обчислювальний блок є основою цієї системи.

Також у складі TCAS є відповідач режиму «S», який реагує на запити в режимах «A», «C» та «S» від радіолокаційних систем ОПР і інших літаків з TCAS. Залежно від режиму роботи чужого відповідача, TCAS отримує інформацію про відстань та азимут, а також, у деяких випадках, інформацію про висоту для координації дій обох літаків.

Кожен літак з відповідачем режиму «S» має унікальну адресу ICAO, що дозволяє безпосередньо обмінюватися даними з іншими системами для спільної роботи у разі конфлікту. Ця адреса не пов'язана з кодами, які використовуються під час польоту.

Відповідач режиму «S» також передає дані від датчика барометричної висоти та пульта управління в обчислювальний блок TCAS.

Важливо зазначити, що TCAS не може виявити літаки, які вимкнули відповідач режиму «S» або перебувають у режимі очікування, а також літаки з нестандартними відповідачами. Для запобігання зіткнень необхідно використовувати не лише TCAS або КПР, але й інші методи безпеки.

Отже, всі сучасні системи уникнення зіткнень потребують наявності радіоканалу для обміну інформацією та відповідного обладнання на інших повітряних суднах. У відсутності радіозв’язку між цими апаратами неможливо точно виміряти їхні координати та параметри руху, що значно збільшує ризик зіткнення.

1.2.2. Система попередження зіткнень БПЛА

За період з 2010 по 2016 рік відбулося понад 1300 випадків зіткнень літаків цивільної авіації з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) відповідно до статистичних даних Європейського центрального репозитарію (ECR), які представлені у відсотках залежно від фази польоту літаків-спостерігачів (див. рис. 1.8).

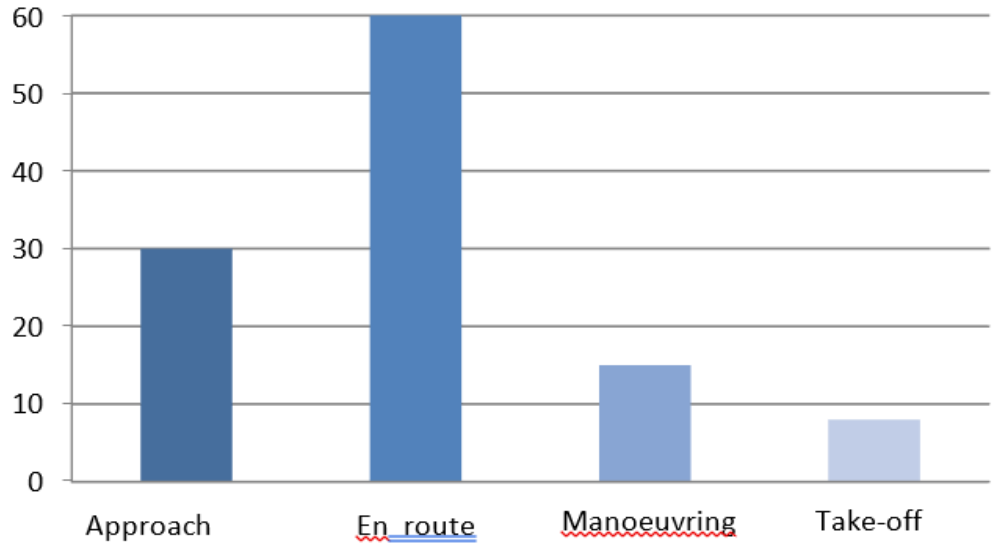


Рис. 1.8. Зустріч із БПЛА у за фазами польоту у період 2010- 2016 роки.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) – це літальні апарати, які можуть літати та виконувати завдання без фізичної наявності пілота на борту (рис. 1.9).

Рис. 1.9. Безпілотні літальні апарати

Безпілотні літальні системи включають у себе літальні апарати, системи зв’язку між БПЛА та земним оператором або центром керування. Політ безпілотних літальних апаратів може мати різні рівні автономності, починаючи від управління здалеку людиною-оператором до автономних польотів за допомогою вбудованих комп'ютерів на борту.

На сьогоднішній день сфера використання безпілотних літальних апаратів є дуже розширеною. Оскільки БПЛА є літальними апаратами, які керуються здалеку, вони добре підходять для спостереження та виконання завдань у важкодоступних або непрактичних для людини місцях. Класифікація безпілотних літальних апаратів наведена на рисунку 1.10.

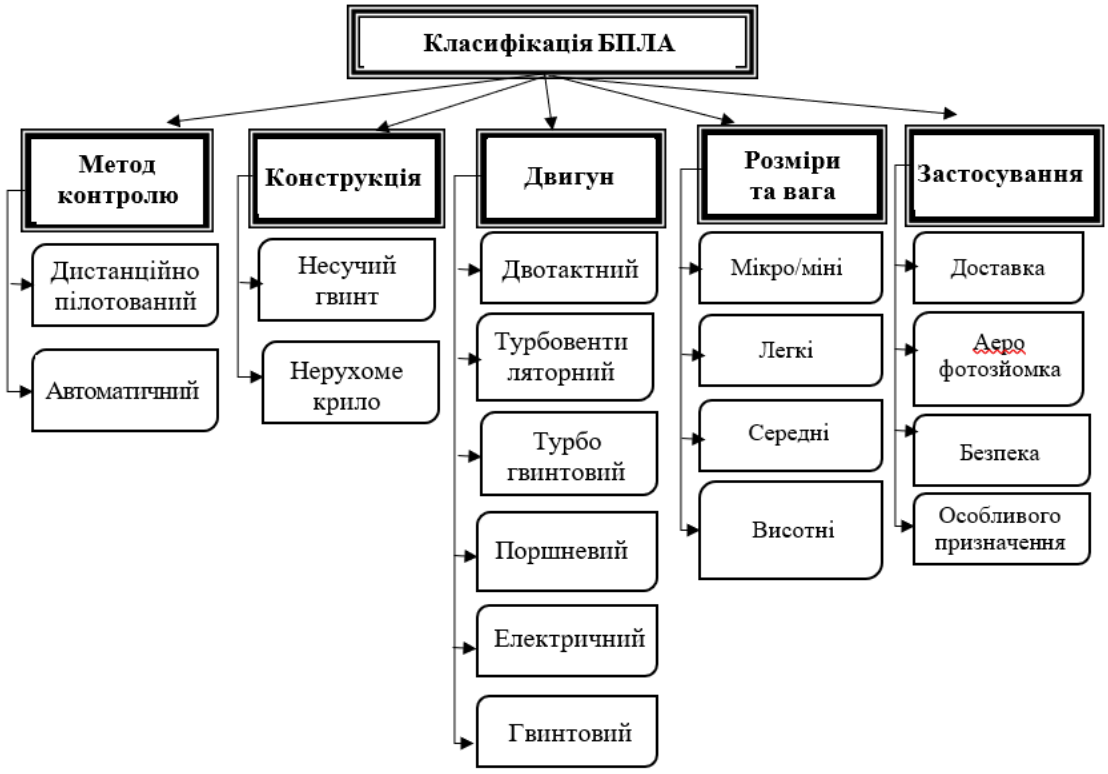


Рис. 1.10 Класифікація БПЛА

БПЛА охоплюють широкий діапазон масо-габаритних характеристик: від нано до важких безпілотних літальних апаратів особливого призначення, маса яких досягає 11 тон (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Категорії БПЛА

Категорії БПЛА	Вага (кг)	Дальність польоту (км)	Швидкість підйому (м)	Тривалість польоту (год)
Нано	<5	до 1	до 150	до 0,5 год.
Мікро	150	до 10	до 250	до 1,5 год.
Міні	150	до 20	150-250	до2,5 год.
Легкі	200	30-70	до 3000	2-6 год.
Середні	1250	70-500	5000-14000	6-50 год.
Висотні (Важкі)	1500	понад 2000	до 20000	24-50 год.

Усі безпілотні літальні апарати (БПЛА) мають стандартний набір авіоніки для управління та виконання завдань. Проте лише середні та важкі БПЛА мають вбудовані системи запобігання зіткнень.

Небезпечні ситуації, коли безпілотні літальні апарати наближаються до літаків чи інших БПЛА, можуть виникати при великих швидкостях. Тому покладатися лише на візуальний контроль вважається ненадійним. Таким чином, була розроблена система виявлення та уникнення DAA (Detect-And-Avoid-System), щоб уникати таких небезпечних ситуацій.

Ця система складається з двопанельної активної антени з електронним скануванням (див. рис. 1.11), яка дозволяє пілоту визначати та відстежувати повітряні судна в зазначеній зоні огляду. Бортовий радар дозволяє відстежувати одночасно кілька цілей і продовжувати пошук нових. Це є ключовою складовою бортового обладнання системи виявлення та уникнення DAA.

Рис. 1.11. Бортовий радар DAA

Функції системи виявлення та уникнення (DAA) можна розділити на три основні групи:

1. Виявлення та спостереження сусідніх повітряних суден з оцінкою їхньої потенційно небезпечної активності.
2. Ідентифікація цих потенційно небезпечних ситуацій.
3. Запобігання небезпечним та конфліктним ситуаціям шляхом побудови безпечних маршрутів ухилення та виконання маневрів ухилення.

Система DAA включає кілька підсистем, які вирішують конкретні завдання:

1. Бортовий радар призначений для визначення повітряних суден без відповідного обладнання.
2. Система запобігання зіткнень TCAS, яка сумісна з технологіями цивільної авіації.

3. Супутникове автоматичне залежне спостереження-мовлення для передачі інформації про політ та отримання аналогічних даних від інших учасників повітряного руху.
4. Система прогнозування та відображення конфліктів (Conflict Prediction and Display System).

Система виявлення та уникнення (DAA) призначена для виявлення та уникнення зіткнень з іншими повітряними суднами. Однак, враховуючи те, що швидкість літаків перевищує швидкість БПЛА, а маса радіолокатора становить приблизно 70 кг, встановлення такої системи на легких та надлегких БПЛА є неможливим. Тому систему запобігання зіткнень необхідно встановлювати на більш швидкісних пілотованих літаках.

Легкі БПЛА не мають транспондера АТС, тому вони не виявляються системами TCAS. Крім того, через їхні малі розміри їх важко помітити візуально. Проте деякі типи легких і середніх БПЛА можуть підніматися на висоту 500 м і більше, розвиваючи швидкість понад 100 км/год, що створює загрозу для літаків на низькій висоті (див. рис. 1.12) [3, 4].

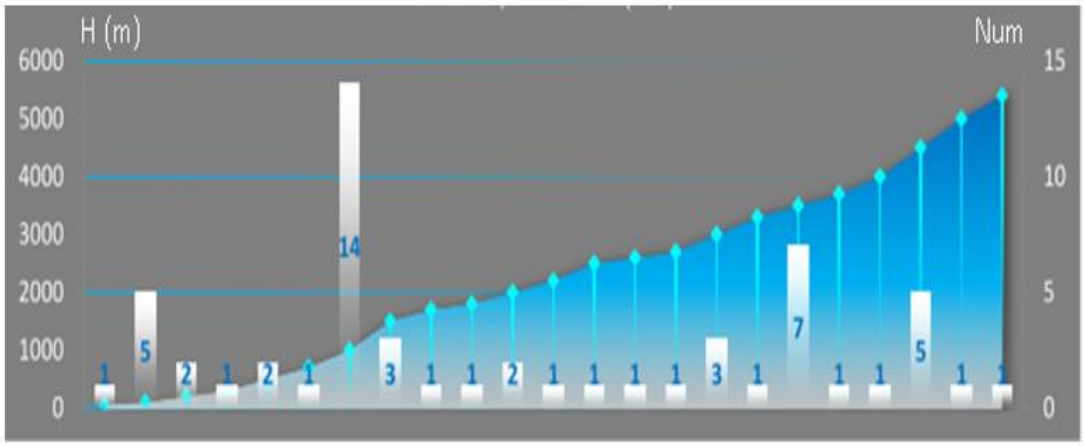


Рис. 1.12. Розподіл висот, на яких зафіксовані БПЛА, що порушують порядок використання повітряного простору України.

1.2.3. Проблема з безпекою польотів у відношенні до птахів

Конфлікт між повітряними суднами та птахами існує вже протягом тривалого часу. Уже у початку двадцятого століття стали відомі перші випадки, коли ці зіткнення призвели до аварій літаків та людських жертв. Проте міжнародна

спільнота звернула увагу на цю проблему лише у 1960 році. Зі зростанням числа польотів у цивільній авіації небо стало вкрай щільним, тому інциденти з птахами стали значно частішими (див. рис. 1.13).

Рис. 1.13. Птахи навколо літака

Орнітологічна безпека польотів охоплює комплекс заходів для зменшення ризику зіткнень літаків з птахами та іншими представниками дикої природи. В сучасних аеропортах використовуються засоби відлякування птахів, але ефективні методи відлякування на борту літаків на безпечній відстані поки що не розроблено. Часто застосовуються світлові засоби, такі як включення посадкових фар під час посадки та зльоту у потенційно небезпечних зонах.

Зовнішнє середовище має значний вплив на безпеку польотів, особливо за умови двох факторів: погодних умов і складних орнітологічних умов. Це вказує на важливість орнітологічної безпеки як ключової складової безпеки польотів.

Зіткнення з птахами може стати серйозною загрозою польоту, особливо для невеликих літаків, оскільки воно може спричинити значні пошкодження конструкції та призвести до втрати тяги для літаків з реактивними двигунами. Такі інциденти можуть траплятися на будь-якій фазі польоту, проте найчастіше вони відбуваються під час зльоту, набору висоти, заходу та посадки через активність птахів на низьких висотах.

Згідно зі статистикою за період з 2014 по 2019 роки, вплив орнітологічного середовища на безпеку польотів в Україні має сезонний характер та посилюється влітку через міграцію великої кількості птахів через територію України (див. рис. 1.14).

Зіткнення з птахами, кількість подій. За аеропортами (2014-2019рр.) з накопиченням

Аеропорт	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	Всього
Львів	2	2		1	3	5	9	11	4	3	3	1	44
Жуляни	1				5	4	8	1	2				21
Харків	2		1			3	8	2	1	2			19
Одеса		1	1		2	5		2		1			12
Бориспіль			1	1	2		5		1				10
Херсон							3	1		1			5
Дніпро							1	1	1				3
Донецьк							1	1					2
Запоріжжя								1		1			2
Бергамо									2				2
Кривий Ріг					1								1
Івано-Франківськ						1							1

Рис. 1.14. Зіткнення літаків із птахами та кількість подій в аеропортах за 2014-2019 роки

Найбільш ризикованими фазами польоту є зліт та посадка повітряних суден, оскільки на цих етапах літаки перебувають на висотах, які доступні для польотів птахів. Більш того, під час цих фаз птахи перебувають у безпосередній близькості до населених пунктів, що сприяє їхньому легшому доступу до їжі (див. рис. 1.15).

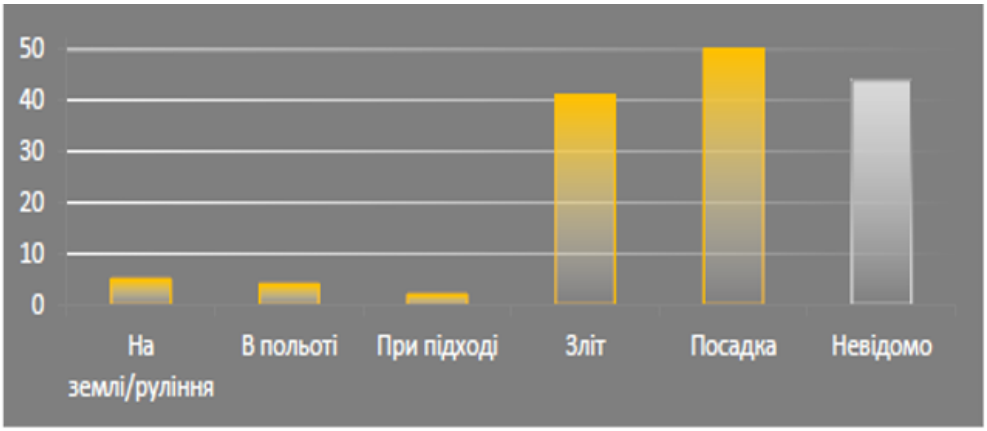
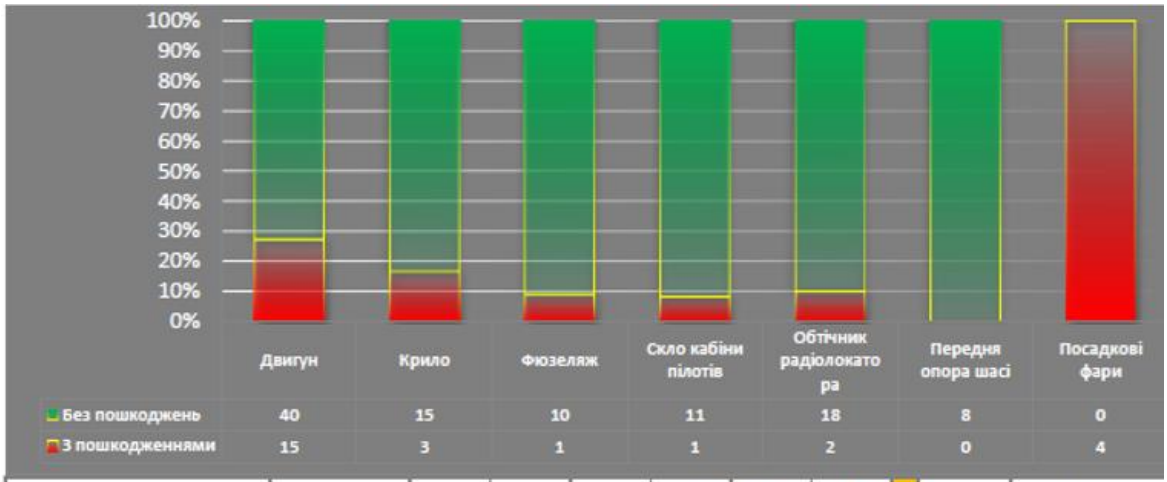


Рис. 1.15. Зіткнення з птахами на етапах польоту за 2014-2019 роки

За зібраною статистикою, найбільш вразливими до пошкоджень під час зіткнень з птахами на повітряних суднах є двигуни, крило та фари (див. рис. 1.16).



	Двигун	Крило	Фюзеляж	Скло кабіни пілотів	Обтічник радіолокатора	Передня опора шасі	Посадкові фари		Припинення зльоту	Несучий гвинт вертольоту
Без пошкоджень	40	15	10	11	18	8	0		3	1
З пошкодженнями	15	3	1	1	2	0	4			
Всього	55	18	11	12	20	8	4			
%, пошкоджень	27	16	9	8	10	0	100			

Рис. 1.16 Зіткнення з птахами, типи пошкодження ПС за 2014-2019 роки

1.3. Технічні системи захисту повітряного простору аеропортів

На сучасний момент для моніторингу повітряного простору аеропортів використовуються служби безпеки аеропорту, які використовують радіолокаційні засоби, такі як Merlin та Robin avian radar. Ці системи є основними у виявленні потенційно небезпечної активності птахів та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в межах аеропортової зони. Програмне забезпечення надає можливість відстеження руху птахів, БПЛА, повітряних куль, а також інших об’єктів у повітрі (рис. 1.17.)

Рис. 1.17. Системи Merlin та Robin avian radar

Основною метою функціонування радіолокаційної системи для виявлення птахів є ідентифікація та виявлення птахів у зоні аеропорту, а також попередження можливих зіткнень з ними. Зібрана інформація від радіолокатора передається до центру керування аеропортом та до кабіни екіпажу (рис. 1.18). Це дозволяє пілотам уникати ситуацій, пов'язаних із зіткненням, як з одним окремим птахом, так і зі зграєю птахів.

Рис. 1.18. Інформація від Robin avian radar

Радіолокатор для виявлення птахів дозволяє розширити можливості спостереження за часом і збільшити зону огляду за відстанню і висотою.

Система радіолокатора для виявлення птахів складається з чотирьох модулів (див. рис. 1.19):

- Пульт керування;
- Блок сканування та антена;
- Цифровий процесор обробки сигналів;
- Дисплей.

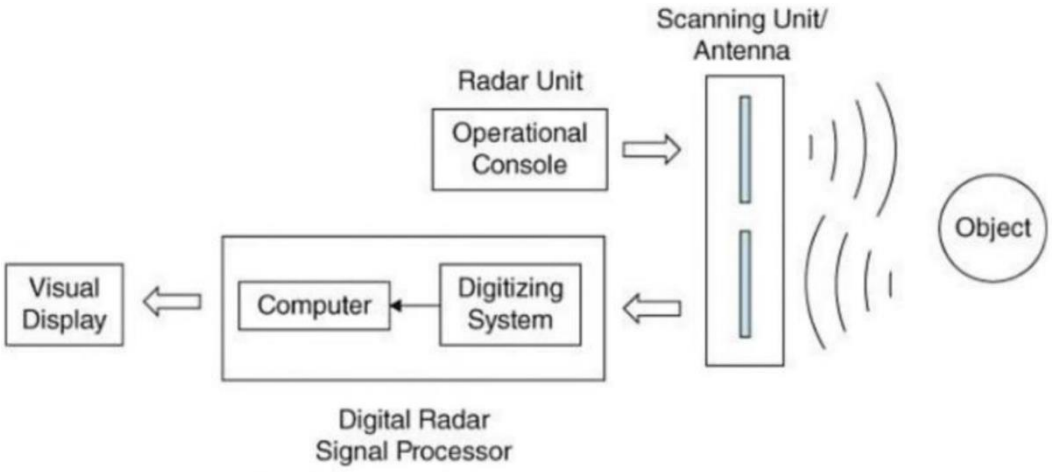


Рис.1.19. Схема радіолокатора виявлення птахів

Радіолокатор складається з пульта управління, обладнаного екраном індикатора. Цей пульт використовується для контролю живлення, діапазону, швидкості обертання антени та відображення показників положення на площині.

Система радіолокації випромінює електромагнітні хвилі у вигляді імпульсів або радіосигналів через антену. Частина цих сигналів відбивається від об'єктів, навколишніх радаром, й повертається назад. Відбитий сигнал піддається обробці для усунення шуму та інших перешкод, щоб виявити ціль, яку потім можна відстежувати.

Блок сканування складається з передавальних та приймальних антен. Антена створює направлений промінь для сканування прилеглої зони. Переміщення антени здійснюється двома способами: механічно та електрично у вертикальній та горизонтальній площинах.

Існують дві основні типи антен:

- антенна решітка зі щілинами;
- параболічна антена.

Радіолокатор виконує наступні завдання:

- передача радіолокаційних зображень аеропортові, що допомагає керівникам польотів швидко реагувати на невідомі літальні апарати або птахів;
- визначення неочікуваних загроз від птахів, які не виявляються за звичайними методами боротьби з ними;
- створення бази даних для прогнозування птахів у аеропорту та передачі цієї інформації іншим аеропортам;
- прийняття заходів для зменшення наслідків пташиного ризику;
- виявлення зв'язку між умовами середовища та активністю птахів у небезпечних районах;
- розуміння природи руху та кількості птахів.

Подвійна конфігурація антен радіолокатора для виявлення птахів Robin, що складається з однієї вертикальної та іншої горизонтальної антени, забезпечує тривимірне відслідковування зон зльоту-посадки, коридорів зльоту та посадки. Вона експлуатується на висоті від рівня землі до 15000 футів (4,5 км) з азимутом 360° навколо аеродрому на відстані 7-8 миль або більше, залежно від рельєфу місцевості. Характеристики радару виявлення птахів Robin наведено у таблиці 1.2.

Таблиця. 1.2.

Характеристика радіолокатора виявлення птахів Robin

Параметр	Горизонтальна антена	Вертикальна антена
Метод формування сигналу	імпульс	імпульс
Частота	3050 МГц (S-діапазон)	9410 МГц (X-діапазон)
Максимальна вихідна потужність	60 кВт	25 кВт
Тип сканування	механічний	механічний
Швидкість обертання	45об/хв	24об/хв
Інструментальна дальність	10 км	6 км
Дальність виявлення (1 SAT)	6 км	2.5 км
Дальність виявлення (2 SAT)	10 км	3.5 км
Зона огляду по азимуту	360°	20°
Зона огляду по куту місця	12,5°	90°
Ширина променя	1,7°	20°
Висота променя	25°	0,9°
Вага антени	40 кг	13 кг
Вага мотору	93 кг	42 кг

Система Robin складається із радіолокатор з горизонтальною діаграмою направленості S-діапазону (2000-4000 МГц) і радіолокатор з вертикальною діаграмою направленості X-діапазону (8000-12000 МГц). Горизонтальний радіолокатор S-діапазону визначає наявність та кількість птахів вдень та вночі на відстані до 10 кілометрів, зазначаючи їхнє положення, напрямок, швидкість руху та маршрут. Радіолокатор X-діапазону охоплює певну площу приблизно 5 км. Комбінування горизонтального та вертикального зображення радару Robin утворює просторове 3D зображення. Ця конфігурація часто використовується в авіації для відстеження руху диких тварин та захисту аеропортів від орнітологічних ризиків.

Висновок: З аналізу небезпечних зближень і зіткнень повітряних об'єктів стало відомо, що існує потенційна проблема безпеки польотів, яка включає ризик зіткнення літака з об'єктами під час польоту.

Системи попередження зіткнень, такі як TCAS та DAA, широко використовують транспондери АТС і ADS-B для моніторингу руху та запобігання небезпечних зближень і зіткнень. Проте, наявні легкі міні та мікро БПЛА, які не обладнані транспондерами, а також птахи, які не виявляються сучасними системами попередження зіткнень, вимагають застосування радіолокаційних систем виявлення птахів, таких як Merlin та Robin Avian System, особливо в аеропортових зонах.

У зв'язку з цим, під час польоту поза зоною аеропорту, екіпаж використовує візуальний огляд повітряного простору, особливо на малих висотах, для виявлення небезпечних повітряних об'єктів. Щоб полегшити екіпажу виявлення таких об'єктів у напрямку польоту, рекомендується використовувати системи технічного огляду повітряного простору.

РОЗДІЛ 2

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОГЛЯДУ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Основною проблемою всіх сучасних систем уникнення небезпечних зближень та попередження зіткнень у повітрі є їх залежність від зовнішнього зв'язку, оскільки вони потребують наявності радіоканалу для передачі інформації та відповідної техніки на інших повітряних суднах. Якщо немає можливості або несправні засоби обміну навігаційною інформацією (такі як відповідачі ATC-RBS або ADS-B), системи попередження зіткнень не можуть виявити інші літаки, що може призвести до збільшення ймовірності небезпечних зближень та зіткнень.

У даній роботі рекомендується використовувати додаткові датчики у складі автономних систем технічного спостереження. Це дозволить оглядати повітряний простір поблизу літака та виявляти небезпечні повітряні судна на достатній відстані для виконання маневру ухилення від зіткнення. Серед найбільш поширених датчиків таких систем технічного спостереження можна виділити: системи, що отримують інформацію на основі аналізу електромагнітного поля у різних діапазонах довжин хвиль; оптичні датчики, інфрачервоні датчики, системи активної радіолокації, системи пасивної радіолокації та радіометричні датчики.

2.1. Аналіз датчиків технічного зору систем огляду повітряного простору

Найбільш розповсюдженими датчиками, які використовуються в системах огляду повітряного простору, є радіолокаційні, інфрачервоні (тепловізійні), телевізійні, лазерні та акустичні. Таблиця 2.1 містить основні характеристики цих датчиків для систем огляду повітряного простору, які володіють значною роздільною здатністю щодо типових повітряних об'єктів. Усі зазначені датчики можуть бути практично використані та виробляються масово за сучасними технологіями.

Таблиця 2.1.

Основні ознаки датчиків систем огляду повітряного простору

№ з/п	Тип датчика	Формат подання даних	Корисні ознаки
1	2	3	4
1.	Тепловізійний (інфрачервоний) датчик	2D- теплове зображення	Форма, max/min емісія, кількість і розташування гарячих плям, оточення
2.	Лазерний локатор (лідар)	• 3D-зображення • допплерівська модуляція (вібрація) • 2D-поле швидкостей	• Розмір, 3D-форма, розташування об'єктів • Пульсація, структурна і поверхнева частоти • Просторовий розподіл ділянок сцени
3.	Локатор з синтезованим розкривом	2D-зображення	Розмір і розташування об'єктів
4.	Телевізійний датчик	2D-напівтонове відеозображення	Форма, розміри, текстура, внутрішня структура об'єктів, оточення
5.	Мікрохвильовий радар	• Допплерівська модуляція • 2D-зображення	• Швидкість, частота пульсації і ширина пучка • Розмір, формат, кількість і розташування об'єктів
6.	Акустичний датчик	Генерація звукових коливань, відбитий звуковий сигнал	Частоти пульсації, гармоніки відносини частот, джерела специфічного шуму

Всі зазначені види датчиків різняться за обсягом інформації, яку вони забезпечують для виявлення літальних апаратів у повітряному просторі. Ця різниця також зумовлена складністю отримання даних, в якій відображається обсяг обчислень, складність та кількість алгоритмів обробки інформації, технічні можливості пристроїв та швидкість використання наданої інформації.

Оптико-електронні системи (ОЕС) формують зображення об'єктів навколишнього простору, використовуючи електромагнітні коливання оптичного діапазону хвиль. Оптичний діапазон охоплює електромагнітне випромінювання в межах довжин хвиль від 10^{-3} мкм до 1 мм. Цей діапазон включає ультрафіолетову область ($\lambda = 10^{-3}$ ... 0,38 мкм), видиму світлову область (λ = 0,38 ... 0,76 мкм) та інфрачервону (ІЧ) область (λ = 0,76 ... 103 мкм). Різноманітність діапазонів хвиль у ОЕС впливає на їхні можливості в отриманні інформації під час моніторингу навколишнього простору. Телевізійні та тепловізійні (інфрачервоні) датчики належать до пасивних оптико-електронних систем.

Інфрачервоні (ІЧ) датчики розрізняють об’єкти використовуючи різницю температурного контрасту між об’єктом та навколишнім простором (рис. 2.1).

Рис. 2.1. Інфрачервоне зображення повітряного об’єкта

ІЧ-діапазон оптичного випромінювання поділяється на кілька діапазонів хвиль: граничний (-15…300 мкм), дальній (6…15 мкм), середній (3…6 мкм) і ближній (0.75…3 мкм).

Основні переваги інфрачервоних датчиків включають:

- високу роздільну здатність;
- малу споживану потужність, компактні розміри та легку вагу;
- низький вплив атмосферних завад у діапазоні 8…14 мкм;
- охолоджувані ІЧ приймачі мають високу чутливість до контрасту та дозволяють виявляти об'єкти на великій відстані (понад 10 км).

Серед недоліків інфрачервоних датчиків варто відзначити:

- вплив атмосферних завад на ІЧ випромінювання в ближньому та середньому діапазонах;
- використання лише пасивного методу отримання інформації, що ускладнює визначення відстані до об'єктів випромінювання;
- охолоджувані ІЧ приймачі мають високий рівень споживаної потужності та виявляють інерційність при обробці інформації.

Найвідомішими ІЧ-системами в авіації є FLIR (Forward-Looking Infrared - інфрачервона система переднього огляду), які є тепловізійними системами, та IRST (Infrared Search and Tracking - ІЧ-система пошуку і відстеження), що представляють теплотеплопеленгатори. Системи FLIR, які функціонують у діапазоні довжин хвиль від 8 до 13 мкм, стали основними пасивними засобами для літаків, які забезпечують навігацію та виявлення перешкод. ІЧ-система пошуку і відстеження IRST (див. рис.

2.2) є ефективним пасивним засобом для виявлення повітряних об'єктів на великих відстанях та в широких зонах, а її діапазон дії може бути порівняний з діапазоном деяких сучасних бортових радіолокаційних систем (РЛС) для виявлення повітряних об'єктів.

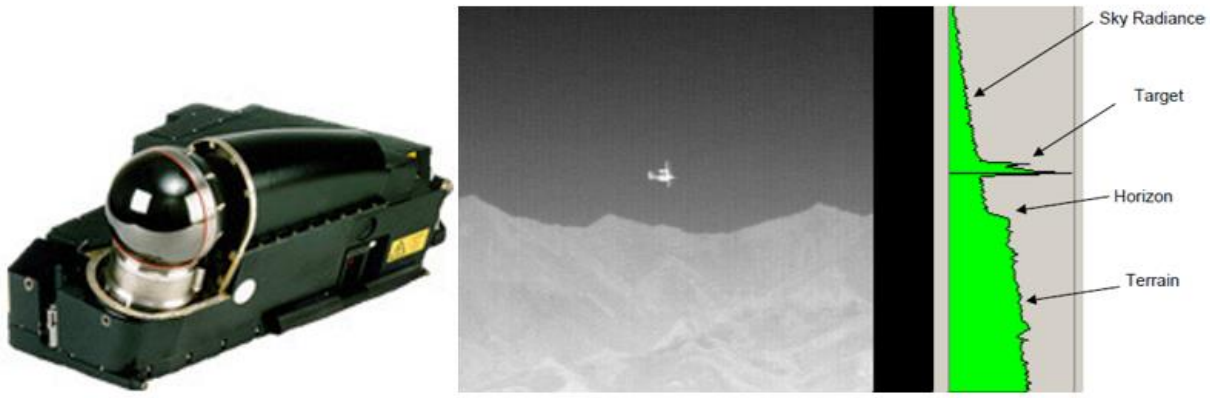


Рис. 2.2. Теплопеленгатор (IRST) та сформоване ним зображення

Система IRST діє в середньому та довгохвильовому ІЧ-діапазонах з довжиною хвиль 3...6 та 8...12 мікрометрів, де ослаблення оптичних хвиль у атмосфері при нормальних умовах прийнятне. Вона виявляє найменші зміни температури об’єктів та фону, проте її функціонування значно залежить від погодних умов. Під час дощу або густого туману її ефективність знижується, тому вона може бути ефективною лише при ясній погоді. Система IRST виконує багато функцій бортової РЛС, проте вона менш вразлива до радіоелектронної протидії. Обидві системи можуть сканувати широку зону огляду та виявляти повітряні об’єкти. РЛС надає точне вимірювання дальності, в той час як IRST, яка є пасивною, не може визначати дальність до об'єктів. У той же час система IRST дає більш точну інформацію про азимут та кут місця та має вищу здатність до розпізнавання об'єктів.

Між ІЧ-системою FLIR, яка застосовується для виявлення наземних об'єктів та навігації, і системою IRST існують деякі відмінності. Наприклад, через меншу частоту сканування система IRST забезпечує більш тривалий процес накопичення сигналів для віддаленого виявлення.

Система FLIR (див. рис. 2.3) може працювати з полем зору, що не перевищує 30×40 градусів, що показується на індикаторі на лобовому склі літака.

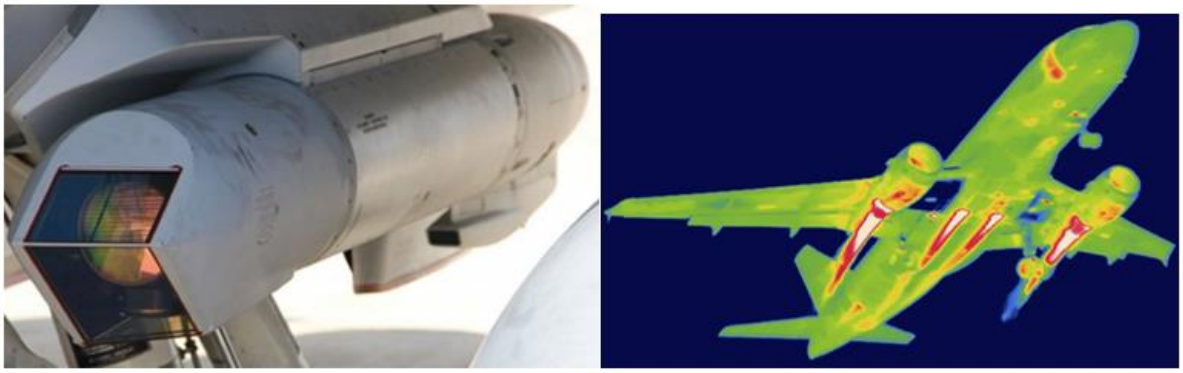


Рис. 2.3. Система FLIR та сформоване нею зображення

Система IRST повинна мати широке поле зору приблизно 140×60 градусів, щоб проводити пошук об’єктів у максимально широкому секторі огляду. Ще однією важливою відмінністю між цими системами є різні вимоги до цифрової обробки даних. Для системи FLIR, якщо зображення відображається безпосередньо на індикаторі або вимагає лише невеликої обробки, це може не бути необхідним. Проте для системи IRST вимагається висока швидкість обробки даних приблизно 30–40 мільйонів операцій в секунду для усунення перешкод і супроводу реальних об'єктів.

З технічного погляду система IRST складніша, але вона може виконувати функції звичайної системи FLIR і діяти як комбінована система FLIR/IRST для пасивного спостереження, супроводу та розпізнавання повітряних об'єктів та навігації.

Телевізійні (ТВ) системи виділяють ознаки на основі різниці у яскравості між об'єктом та навколишнім середовищем (див. рис. 2.4).

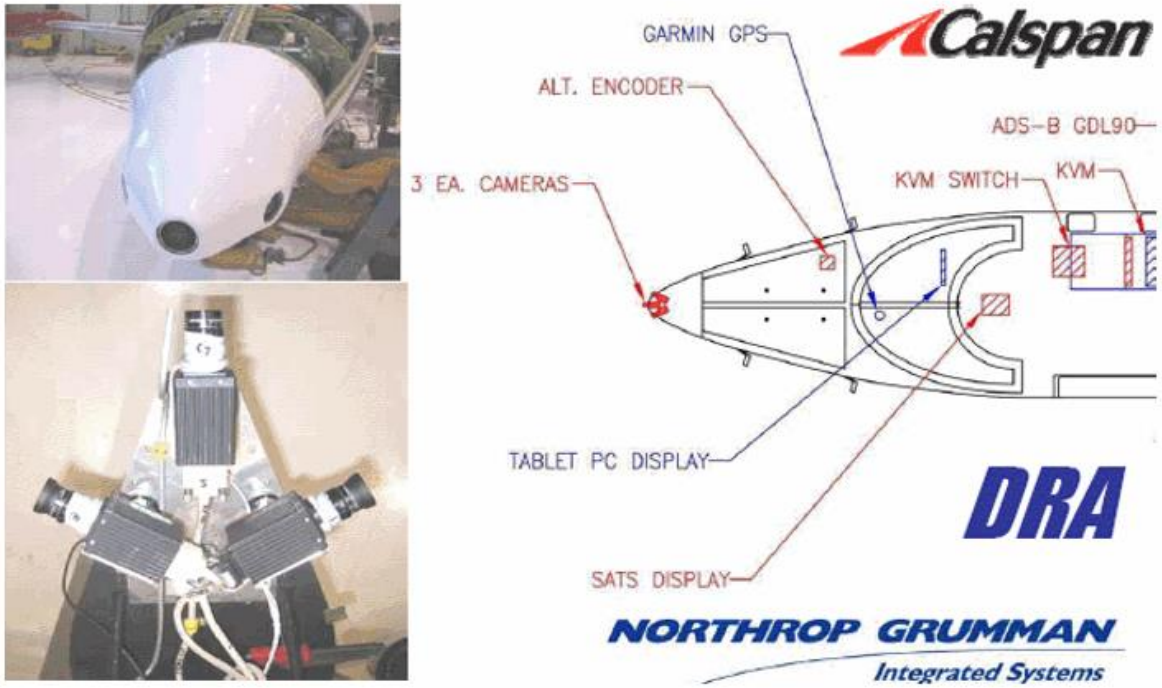


Рис. 2.4. Телевізійна система попередження зіткнень M2CAS.

Телевізійні системи мають ряд переваг:

- не вимагають охолодження;
- нечутливі до змін температури;
- можуть накладати польотні дані на зображення.

Проте вони також мають свої недоліки:

- ефект мерехтіння зображення;
- обмежена освітленість;
- потребують спеціального індикатора через властивість непрямого бачення.

Лазерні локатори (лідари) працюють на основі принципу активної РЛС, вимірюючи відстань до кожної точки простору та кутовий напрямок об'єктів у діапазоні від 0.1 до 1000 мкм (див. рис. 2.5). На відміну від звичайної РЛС, лазерний локатор має вищу роздільну здатність через меншу довжину робочої хвилі. Це дозволяє виявляти навіть малорозмірні об'єкти, наприклад, дроти ліній електропередачі.

Схоже на тепловізійні системи FLIR, лазерний локатор може функціонувати навіть при відсутності денного світла. Однак, на відміну від подібних систем, він здатний створювати тривимірне зображення. Лазерний локатор може виявляти рух об'єктів через виділення доплерівського зсуву частоти імпульсних відбитих сигналів.

Рис. 2.5. Лазерний локатор.

Невелика дальність дії є основним обмеженням для застосування лазерного локатора через значне послаблення лазерного випромінювання атмосферою. В чистій атмосфері максимальна дальність може досягати 10 км, проте при наявності хмар або диму дальність зменшується до рівня тепловізійної системи FLIR. Також до недоліків лазерних локаторів відносять тривалість процесу виявлення об'єктів у великих просторах та високі вимоги до точності супроводу об'єктів, що зумовлено вузьким лазерним променем.

Радіолокаційні системи. У радіолокаційних датчиках виділення ознак виконується на основі обробки сигналів, що відбиваються від радіоконтрастних об’єктів. Ці датчики можуть бути активного або напівактивного типу (див. рис. 2.6).

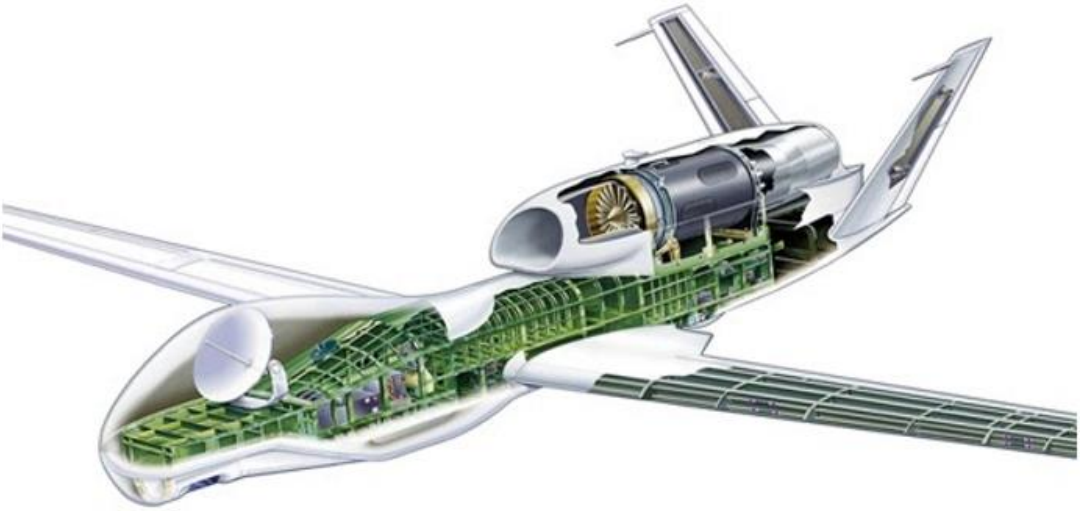


Рис. 2.6. Бортовий радіолокатор БПЛА Global Hawks

Одним з основних компонентів інтегрованих систем моніторингу навколишнього простору є радіолокаційні системи. Вони мають важливе значення завдяки здатності виявляти цілі на значно більших відстанях порівняно з оптико-електронними системами.

Пасивні **акустичні датчики** (див. рис. 2.7) відокремлюють необхідну звукову інформацію у середовищі загального шуму. Проте основним недоліком їх використання є високий рівень паразитного шуму у вихідному сигналі та обмежена селективність.

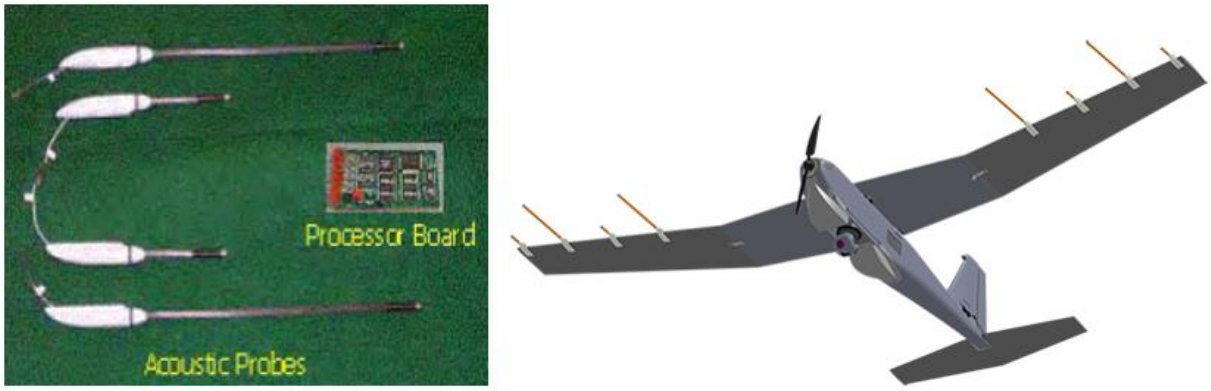


Рис. 2.7. Акустичні датчики

Отриманий аналіз датчиків систем технічного зору для огляду повітряного простору, призвів до наступних висновків щодо їхнього застосування для виявлення повітряних об’єктів на борту повітряного судна:

- Телевізійні датчики виокремлюють об’єкти на основі різниці яскравостей, мають обмежену роздільну здатність на великих відстанях і не працюють в умовах обмеженої видимості.
- Радіолокаційні та лазерні датчики є активними системами, потребують значного енергоспоживання та додаткового простору для розміщення приймально-передавальних антен та об’єктивів.
- Акустичні датчики мають низьку селективність та обмежену захищеність від зовнішніх перешкод.
- Інфрачервоні датчики виявляють об’єкти з тепловим контрастом та можуть виявляти нагріті частини повітряних суден на тлі навколишнього середовища, температура якого змінюється зі зростанням висоти.

Отже, для ефективної роботи систем попередження зіткнень найбільш доцільними для використання у якості датчиків первинної інформації є пасивні інфрачервоні датчики або теплопеленгатори.

2.2. Інфрачервоне випромінювання повітряних об’єктів

Рух будь-якого сучасного повітряного транспорту неможливий без застосування теплових двигунів, які генерують інфрачервоне (ІЧ) випромінювання. Ці хвилі ІЧ можуть бути виявлені системами технічного зору. Крім двигунів, теплові частини фюзеляжу також випромінюють хвилі ІЧ. Тому доцільним вибором для систем попередження зіткнень є застосування пасивних інфрачервоних датчиків (IR sensor) або теплопеленгаторів.

Переваги інфрачервоних датчиків полягають у можливості пасивного виявлення інших повітряних суден на відстанях до 50 км за їх тепловим випромінюванням від двигунів та нагрітих частин фюзеляжу. Це дозволяє визначити кут азимута та кут місця іншого літака, а також виявити наближення чи віддалення «порушника» залежно від зміни теплового випромінювання. З аналізу інтенсивності та спектру інфрачервоного випромінювання можна визначити тип двигуна підвітряного судна. Наприклад, одноконтурний турбореактивний двигун (ТРД) на крейсерському режимі польоту має температуру реактивного струменя 500-700°С, а при зменшенні режиму роботи - відповідно 350-450°С. Такі двигуни можна виявити на відстані 30-50 км. Нагріта частина повітряного судна випромінює ІЧ енергію, і її довжина хвилі залежить від температури (див. рис. 2.8).

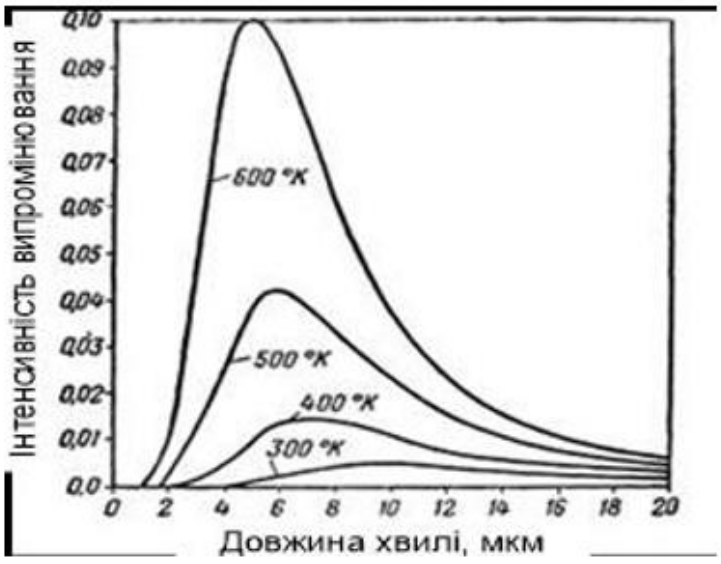


Рис. 2.8. Залежність інтенсивності ІЧ випромінювання від довжини хвилі та температури

Зі збільшенням температури об'єкта змінюються його характеристики інфрачервоного (ІЧ) випромінювання: довжина хвилі, що відповідає максимальній енергії випромінювання, зменшується, а загальна енергія випромінювання збільшується в четвертій степені від температури об'єкта.

У системах попередження зіткнень, найбільш доцільним вибором для ІЧ датчиків є діапазон хвиль від 4 до 12 мікрометрів.

У широкому діапазоні частот усі об’єкти випромінюють електромагнітні хвилі. У ближньому (0,76–3 мкм) та середньому (3–6 мкм) ІЧ-діапазонах потужність

теплового випромінювання об’єктів значно менша, ніж потужність відбитого сонячного випромінювання. Але при переході в довгохвильовий ІЧ-діапазон власне теплове випромінювання об’єктів прирівнюється до потужності відбитої сонячної енергії. Кількість енергії, яку випромінює тіло при температурі Т, згідно з формулою Стефана-Больцмана, залежить від T^4.

Найвища енергія випромінювання тіл при температурі повітря влітку в діапазоні 3-5 та 8-14 мкм. Чим вище температура об'єкта, тим більше випромінюється ІЧ енергії, а її максимум зміщується в бік більш коротких хвиль. Це означає, що теплові об'єкти можна спостерігати у повній темряві як в інфрачервоному, так і в радіодіапазоні.

При оцінці випромінювання в інфрачервоному діапазоні важливо враховувати теплопровідність матеріалів об'єктів спостереження. Вони, підігріваючись від сонячних променів, випромінюють своє власне тепло. Вище 3 мкм потужність власного теплового випромінювання об'єкта може перевищувати потужність відбитого світла. Це призводить до того, що в інфрачервоному діапазоні можна спостерігати різницю в температурі різних частин поверхні об'єкту в порівнянні з фоном.

2.2.1. Основні закони ІЧ випромінювання

Закон Кірхгофа стверджує, що у точці поверхні теплового випромінювача для будь-якої температури і будь-якої довжини хвилі спектральний коефіцієнт направленого випромінювання у визначеному напрямку дорівнює спектральному коефіцієнту поглинання для протилежно спрямованого неполяризованого випромінювання. Іншими словами, чим більше енергії поглинає тіло, тим більше енергії воно випромінює:

$$M_{e\lambda 1}/\alpha_{\lambda 1} = M_{e\lambda 2}/\alpha_{\lambda 2} = \cdots = M_{e\lambda n}/\alpha_{\lambda n} = M_{e\lambda чт}, \qquad (2.1)$$

де $M_{e\lambda чт}$– спектральна щільність енергетичної освітленості чорного тіла; α_λ - спектральний коефіцієнт поглинання.

Закон Стефана-Больцмана говорить про те, що енергетична освітленість чорного тіла залежить від четвертого степеня абсолютної температури:

$$M_e = \sigma T^4,$$

де $\sigma = 5{,}66971 \cdot 10^{-8}$ Вт·м$^{-2}$·К$^{-4}$ - постійна Стефана-Больцмана.

Для будь-якого випромінювача $M_{e\lambda} = \varepsilon_{\lambda T} M_{e\lambda чт}$,

де $\varepsilon_{\lambda T}$– спектральний коефіцієнт випромінювання даного тіла.

Для сірого тіла $\varepsilon_{\lambda T} = f(T) = \varepsilon_T M_{ест} = \varepsilon_T \sigma T^4$.

Закон Планка. Він описує розподіл енергії по спектру довжин хвиль:

$$M_{e\lambda} = M_e(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \left[exp\left({}^{C_2}/_{\lambda T} \right) - 1 \right]^{-1},$$

де $C_1 = 3{,}7415 \cdot 10^{-16}$ Вт·м^2; $C_2 = 1{,}43879 \cdot 10^{-2}$м·К.

При λТ <3000 мкмК для практичних розрахунків даний вираз можна представити у вигляді

$$M_{e\lambda} = C_1 \lambda^{-5} exp\left(-C_2/_{\lambda T}\right)$$

Закон Планка дозволяє розрахувати енергетичну освітленість чорного тіла $M_{\Delta\lambda}$, а отже, і потік його випромінювання, що припадає на заданий або вибраний спектральний діапазон $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.

Закон Голіцина-Віна. Якщо поставити собі за мету визначити довжину хвилі випромінювання, відповідну максимуму кривої $M_{e\lambda} = f(\lambda)$, тобто знайти екстремум функції $M_{e\lambda}$, то отримаємо

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{\mathrm{T}}. \qquad (3.5)$$

де λ_{max} вимірюється в мікрометрах, а *T*- в кельвінах. На практиці це рівняння часто називають законом Голіцина-Віна. Воно вказує на те, що зі збільшенням температури випромінювача максимальне значення випромінювання зсувається вліво по спектру довжин хвиль λ. Тому цей закон також називають законом зміщення (табл.2.2).

Таблиця 2.2

Поверхнева густина випромінювання чорного тіла в спектральному діапазоні $\lambda_1 \ldots \lambda_2$

λ_1, мкм	λ_2, мкм	Поверхнева площина вивчення чорного тіла, $Вт \cdot см^{-2}$ за його температури, К				
		280	290	300	310	750
3,0	5,0	$2{,}76 \cdot 10^{-4}$	$4{,}11 \cdot 10^{-4}$	$5{,}97 \cdot 10^{-4}$	$8{,}48 \cdot 10^{-4}$	$5{,}84 \cdot 10^{-1}$
3,5	5,5	$2{,}68 \cdot 10^{-4}$	$3{,}97 \cdot 10^{-4}$	$5{,}75 \cdot 10^{-4}$	$8{,}13 \cdot 10^{-4}$	$4{,}42 \cdot 10^{-1}$
4,0	5,0	$2{,}38 \cdot 10^{-4}$	$3{,}49 \cdot 10^{-4}$	$5{,}01 \cdot 10^{-4}$	$7{,}02 \cdot 10^{-4}$	$2{,}89 \cdot 10^{-1}$
8,0	10,0	$4{,}20 \cdot 10^{-3}$	$5{,}12 \cdot 10^{-3}$	$6{,}15 \cdot 10^{-3}$	$7{,}32 \cdot 10^{-3}$	$1{,}74 \cdot 10^{-1}$
8,0	12,0	$8{,}59 \cdot 10^{-3}$	$1{,}03 \cdot 10^{-2}$	$1{,}22 \cdot 10^{-2}$	$1{,}43 \cdot 10^{-2}$	$2{,}74 \cdot 10^{-1}$
8,0	14,0	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$	$1{,}48 \cdot 10^{-2}$	$1{,}74 \cdot 10^{-2}$	$2{,}01 \cdot 10^{-2}$	$3{,}34 \cdot 10^{-1}$
10,0	14,0	$8{,}35 \cdot 10^{-3}$	$9{,}72 \cdot 10^{-3}$	$1{,}12 \cdot 10^{-2}$	$1{,}28 \cdot 10^{-2}$	$1{,}60 \cdot 10^{-1}$

2.2.2. Інфрачервоне випромінювання повітряних суден із тепловими двигунами

Джерелами випромінювання повітряних суден із поршневими двигунами є вихлопні патрубки, капоти двигунів та відпрацьовані гази, що виходять з патрубків. Потужність їх випромінювання залежить від температури, розмірів, коефіцієнта випромінювання і повноти згоряння палива. Індикатриса випромінювання також визначається ступенем екранування теплового випромінювання поверхонь та обсягом інших елементів літака.

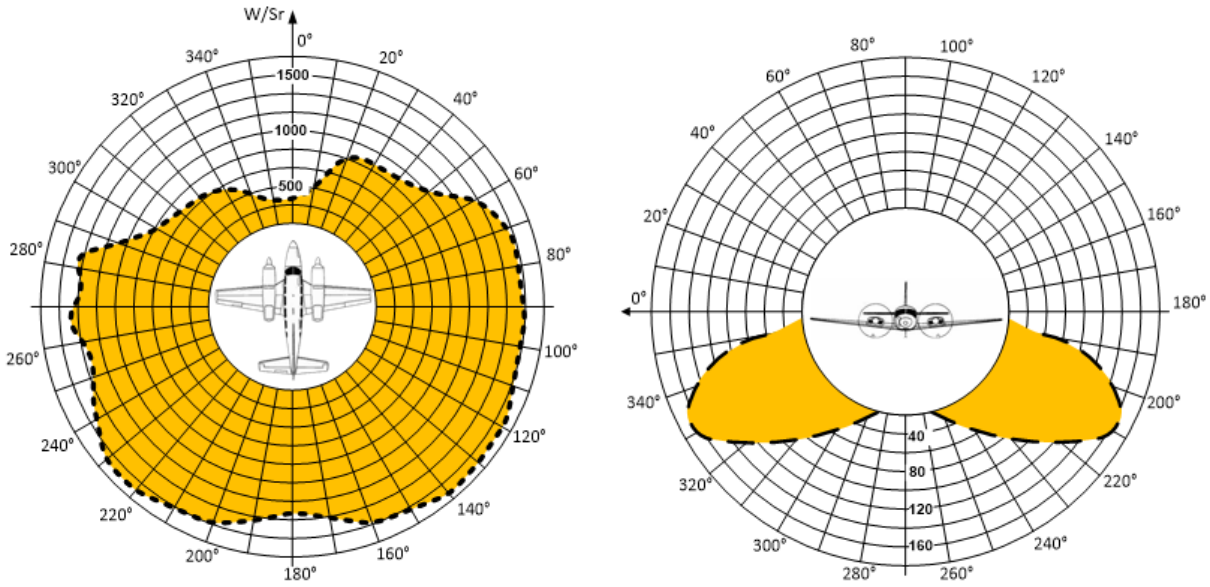
Капоти двигунів мають низьку температуру (90...100°С) і малий коефіцієнт випромінювання (0,2...0,4), тому їхня енергія випромінювання відносно невелика.

Вихлопні гази поршневих двигунів містять багато нагрітих до температури 1000...1100°С дрібних твердих частинок вуглецю. Це пов'язано з неповним згорянням вуглеводневих палив у двигунах внутрішнього згоряння, які, як правило, використовують з недостатньо збагаченою повітрям сумішшю. Вихлопні гази випромінюють енергію у вигляді спектральних ліній або вузьких смуг, включаючи смуги випромінювання парів води з довжинами хвиль 1,3; 1,8 і 2,7 мкм, а також смугу випромінювання двоокису вуглецю з довжиною хвилі 4,3 мкм.

У загальному балансі енергії випромінювання літаків з поршневими двигунами частка випромінювання капотів і вихлопних газів становить від 35 до 45%. Решта випромінювання припадає на вихлопні патрубки, температура яких

коливається від 650...800°С над колектором до 250...350°С у зрізі. Вихлопні патрубки розташовані під центропланом або над ним, тому випромінювання може спостерігатися як у верхній, так і в нижній півсферах. Для виготовлення вихлопних патрубків застосовується жаростійка сталь, що в окисленному стані має коефіцієнт випромінювання близько 0,85.

На рис. 2.9 зображені індикатриси випромінювання літака Piper PA-31, який оснащений двома поршневими двигунами. Поява максимальних значень на представлених кривих (сила IR випромінювання до 1700 Вт/ср у горизонтальній площині та до 120 Вт/ср у вертикальній) пояснюється специфікою розташування вихлопних патрубків і формою струменів відпрацьованих газів двигунів.



а) б)

Рис. 2.9. Індикатриса випромінювання літака Piper PA-31
в горизонтальный (а) та вертикальный (б) площинах

2.3. Вплив атмосферних перешкод на розповсюдження інфрачервоного випромінювання

Під час проникнення через атмосферу інфрачервоне випромінювання слабшає через поглинання та розсіювання молекулами газів, аерозолями, опадами, такими як дощ або сніг, і дрібними частинками, що перебувають у повітрі. Найбільш значним чинником ослаблення випромінювання є молекулярне поглинання. У діапазоні довжин хвиль понад 1 мікрометр і на висотах до 12 км селективне поглинання випромінювання молекулами водяної пари, вуглекислого газу та озону має найбільший вплив на роботу інфрачервоної апаратури.

Концентрація водяної пари у атмосфері залежить від різних чинників, таких як географічне розташування, висота, пора року та місцеві метеорологічні умови, коливається від 0,001% до 4% (за обсягом). На великих висотах, понад 12 кілометрів, вміст водяної пари дуже малий. Смуги сильного поглинання випромінювання від пари води відповідають таким інтервалам довжин хвиль, мкм: 1,095–1,165; 1,319–1,948; 1,762–1,977; 2,520–2,845; 4,24–4,4; 5,25–7,5.

Концентрація вуглекислого газу на висотах до 20–25 кілометрів коливається від 0,03% до 0,05% (за обсягом). Смуги сильного поглинання випромінювання від вуглекислого газу відповідають інтервалам довжин хвиль, мкм: 1,38–1,50; 1,52–1,67; 1,92–2,1; 2,64–2,87; 4,63–4,95; 5,05–5,35; 12,5–16,4.

Поглинання інфрачервоного випромінювання озоном, оксидом вуглецю, діоксидом азоту та метаном у нижніх шарах атмосфери може бути несуттєвим.

Визначення пропускання інфрачервоного випромінювання через атмосферу є складною задачею, що базується на аналітичних моделях молекулярного поглинання та розсіяння, а також на моделях розсіювання на аерозолях. Точне рішення цієї проблеми важке, іноді його необхідність не виникає через невідомі метеорологічні умови та інші фактори, що впливають на застосування тепловізійного обладнання. Тому для приблизних розрахунків максимальної дальності дії та температурної чутливості теплопеленгаторів можна скористатися експериментальними даними щодо пропускання інфрачервоного випромінювання атмосферою в діапазонах, де чутливі приймачі випромінювання працюють.

Поглинання випромінювання залежить від кількості поглинаючих молекул на шляху його проходження. Для визначення інтенсивності поглинання інфрачервоного випромінювання парами води використовують параметр, що позначається ω, що вказує на товщину шару води в міліметрах, який утворився б при конденсації всієї водяної пари уздовж шляху проходження, наприклад, у посудині циліндричної форми. Чим більше значення ω, тим більший коефіцієнт поглинання атмосфери. Величина ω залежить не лише від довжини шляху, але й від температури і відносної вологості повітря, і може варіюватися від 0,1 до 1000 мм.

Поглинання випромінювання вуглекислим газом також залежить від числа поглинаючих молекул на шляху. Воно безпосередньо пропорційне довжині шляху та тиску повітря, а обернено пропорційне його температурі. При збільшенні висоти

інтенсивність поглинання інфрачервоного випромінювання парами води і вуглекислим газом зменшується. Це враховується коригувальними коефіцієнтами, що залежать від висоти.

На рис. 2.10 показана залежність коефіцієнта пропускання атмосфери від довжини хвилі випромінювання. Цей графік експериментально отримано для горизонтального шляху завдовжки 1,8 км на рівні моря за умови, що товщина шару осілої води складає 17 мм [10]. У верхній частині рисунка показано, молекули яких газів поглинають інфрачервоне випромінювання. Ділянки з високим коефіцієнтом пропускання називаються *атмосферними вікнами*. Для сучасної інфрачервоної техніки найбільш значущими є спектральні діапазони пропускання 0,95–1,05; 1,15–1,35; 1,5–1,8; 2,1–2,4; 3,3–4,2; 4,5–5,1 і 8–13 мкм.

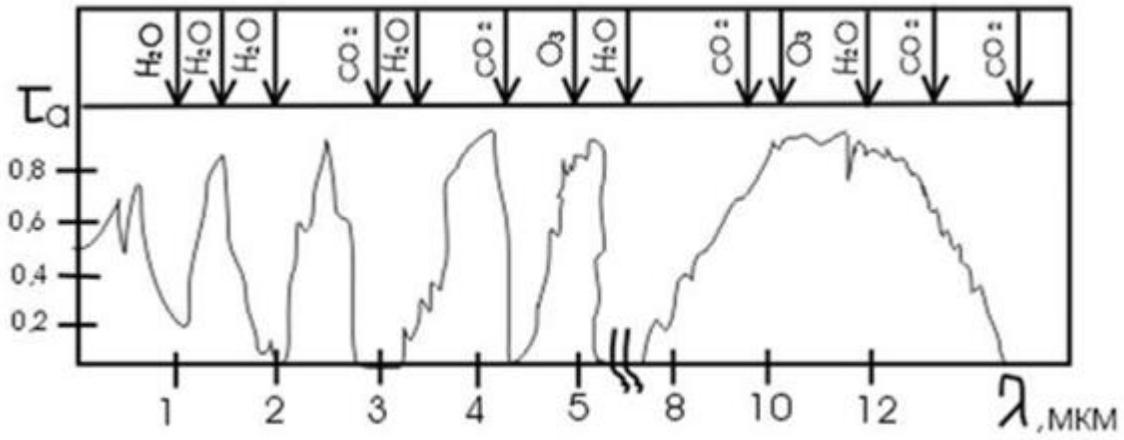


Рис. 2.10. Графік залежності коефіцієнта пропускання атмосфери τ_a від довжини хвилі

Випромінювання, як вже зазначено, не тільки поглинається молекулами води, вуглекислого газу та озону, а й розсіюється молекулами повітря (молекулярне розсіювання) і різними частинками, що присутні в атмосфері: кристалами солей, порошинами, піднятими вітром з поверхні землі, залишками продуктів згоряння, краплями води і кристалами льоду (аерозольна розсіювання). Хоча можна розрахувати коефіцієнти пропускання атмосфери монохроматичного випромінювання з урахуванням молекулярного розсіювання з певною точністю, розрахунок коефіцієнтів пропускання випромінювання з урахуванням аерозольного розсіювання майже неможливий, оскільки для цього потрібно знати кількість, розміри, форму і склад речовини аерозольних часток, на яких відбувається розсіювання випромінювання. Тут значну роль відіграють експериментальні дані, які збираються при певних значеннях *метеорологічної видимості.* Цей параметр характеризує ступінь затемнення атмосфери і є найбільшою відстанню видимості вдень темних об'єктів з кутовими розмірами понад 30 хвилин, що видно на тлі неба на горизонті. Метеорологічна видимість змінюється в широкому діапазоні: від 20 до 50 км (чисте повітря без опадів) до 0,2 до 0,05 км (сильний туман або сильний сніг).

Туман і хмари суттєво розсіюють випромінювання і майже непрозорі для інфрачервоних променів. При товщині хмарності понад 20 м, коли сонце не проглядається через хмари, інфрачервоне випромінювання також не проходить

через них. Дощ, на відміну від туману і хмар, досить добре пропускає інфрачервоне випромінювання. Наприклад, коефіцієнт пропускання інфрачервоного випромінювання на шляху завдовжки 1,8 км при слабкому дощі дорівнює 0,88, при середньому - 0,74, при сильному - 0,66 і при зливі - 0,38. У таких умовах можлива робота тепловізійної апаратури, але на зменшених відстанях.

Висновок: Таким чином, аналіз датчиків систем технічного огляду повітряного простору показав, що телевізійні датчики мають обмежену здатність виявлення на великих відстанях, радіолокаційні та оптоелектронні системи потребують більше енергії та місця для елементів. Тому, інфрачервоні датчики виявилися більш вигідними для виявлення повітряних об'єктів із тепловими двигунами.

Також, селективне поглинання випромінювання молекулами водяної пари, вуглекислого газу і озону виявляє найбільший вплив на розповсюдження інфрачервоного випромінювання залежно від діапазону довжин хвиль.

3 РОЗДІЛ

ІНФРАЧЕРВОНІ ДАТЧИКИ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ПІД ЧАС ПОЛЬОТУ

Відповідно до основних законів теплового випромінювання, тіло з низькою температурою має більшу довжину хвилі та низьку енергію теплового випромінювання. Тому, важко виявити БПЛА із електродвигунами на великих відстанях, із застосуванням пасивних інфрачервоних датчиків. Однак, для металів, у міру збільшення довжини хвилі, зменшується спектральне випромінювання та збільшується коефіцієнт відбиття. У цьому випадку, пропонується виявляти БПЛА активною інфрачервоною системою, яка опромінює повітряні об'єкти променями інфрачервоного діапазону з довжиною хвилі 8-14 мкм, тим самим збільшуючи температуру та інтенсивність випромінювання повітряного об'єкта.

Використання інфрачервоного випромінювача, заданої довжини хвилі дозволяє об'єктам відбивати це випромінювання, збільшуючи роздільну здатність виявлення. Отже, якщо інфрачервоний випромінювач буде використовуватись на борту повітряного судна, інфрачервона система попередження зіткнень отримає функції інфрачервоного локатора. В якості інфрачервоного випромінювача доцільно застосувати лазер інфрачервоного діапазону, який має вузький перетин променя та велику дальність дії. Тому проведемо дослідження зміни інтенсивності інфрачервоного випромінювання БПЛА опроміненого лазером.

3.1. Лазерний нагрів матеріалів

Взаємодія лазерного випромінювання з високо поглинаючими матеріалами в широкому діапазоні щільності світлового потоку може бути наочно описана за допомогою теплової моделі. Ця модель розглядає весь процес взаємодії на кілька етапів: 1) поглинання світла та передача енергії на теплові коливання твердої решітки; 2) нагрівання матеріалів без їх руйнування; 3) руйнування матеріалу та розширення отриманих продуктів (абляція); 4) охолодження після завершення взаємодії.

Процеси поглинання в матеріалах починаються з моменту взаємодії випромінювання з поверхнею середовища. Частина світла відбивається, а інша

частина проникає в матеріал, де поглинається, що зазвичай швидко перетворюється в тепло. У таких ситуаціях зміна густини світлового потоку описується законом Бугера:

$$q(z) = Aq_0e^{-\alpha z}$$

де q_0 –щільність падаючого світлового потоку на поверхню матеріалу; A – поглинаючий матеріал; α – лінійний коефіцієнт поглинання.

Координата z вимірює відстань від поверхні до внутрішньої частини матеріалу. Формула для лінійного поглинання випромінювання застосовна до металів, металізованих напівпровідників і діелектриків у широкому діапазоні довжин хвиль. Однак конкретні значення величин A і α, що входять у цю формулу, а також механізми поглинання світла та його перетворення в тепло можуть суттєво відрізнятися для матеріалів різних класів.

У металах світлові кванти переважно поглинаються електронами провідності, які розсіюють енергію у вигляді теплових коливань решітки під час декомпресії від 10^{-11} до 10^{-12} с. Цей процес відбувається на шарі товщиною близько 10^{-6} до 10^{-5} см, що приблизно відповідає глибині проникнення світла в метал. Оскільки декомпресія набагато коротша, ніж тривалість світлових імпульсів, використовуваних для обробки матеріалів (не включаючи ультракороткі лазерні імпульси), можна припустити, що під час лазерного імпульсу джерело тепла, що нагріває металеву решітку, реагує на зміни світлового потоку з незначною затримкою в часі.

Більшість металів у діапазоні довжин хвиль від далекого інфрачервоного до майже ультрафіолетового характеризуються високою відбивною здатністю R = 1-A, (особливо для благородних металів) та великим коефіцієнтом поглинання α приблизно від 10^5 до 10^6 $см^{-1}$. На відміну від металів, у напівпровідників з низькою концентрацією вільних електронів при кімнатній температурі поглинання визначається переважно зв’язаними носіями. Напівпровідники сильно поглинають випромінювання, починаючи з певної частоти v, для якої квантова енергія h_v перевищує ширину забороненої зони E_g. Лінійний коефіцієнт α може досягати

значень до 10^3 до 10^4 $см^{-1}$. Якщо $h_v > E_g$, то дія лазерного випромінювання призводить до внутрішнього фотоефекту в напівпровіднику. З часом концентрація вільних носіїв зростає. Однак на його збільшення впливають різноманітні види рекомбінації та дифузії електронів та дірок через наявність градієнта концентрації носія. Інтенсивне вироблення тепла в решітці напівпровідника починається, коли досягається така концентрація електронів, коли вони самі поглинають значну частину світлового потоку, тобто коли напівпровідник «металізується». Початковий коефіцієнт відбиття напівпровідників зазвичай менше, ніж у металів. Механізми поглинання світла в непрозорих неметалічних матеріалах можуть бути різноманітними, включаючи механізми міжзонного та внутрішньозонного поглинання, а також поглинання домішок та дефектів, що призводить до внутрішньої абсорбції матеріалу під час його нагрівання.

Початкові експерименти щодо впливу лазерного випромінювання на матеріали, проведені в 60-х роках минулого століття, вказали на те, що фізично лазерне нагрівання не відрізняється від інших методів нагріву. Як у будь-якому іншому процесі нагріву, головною характеристикою є температура, а сам процес нагрівання полягає в збільшенні амплітуди теплових коливань решітки. В твердих тілах тепло передається через механізми теплопровідності, де для металів і сильно вироджених напівпровідників головним є електронний теплопровідності, а для неметалів - решітка.

Лазерне нагрівання може призводити до змін оптичних та теплофізичних характеристик матеріалу, його теплового розширення, а також фазових переходів від твердого стану до плавлення. У певних випадках під час нагрівання може відбуватися активізація процесів дифузії в твердому тілі та хімічних реакцій на його поверхні та в поверхневих шарах. Таким чином, лазерне нагрівання матеріалів відбувається за участю звичайних, вже вивчених явищ. Однак високі швидкості нагріву та охолодження та великі градієнти температури створюють особливості для лазерного нагріву, що може призводити до суттєвих відмінностей у теплових процесах, викликаних лазерним впливом. Однією з ключових особливостей лазерного нагрівання є зміна оптичних властивостей речовини. Кількість тепла, що

виділяється, та його просторовий розподіл безпосередньо залежать від показників поглинання та поглинальної здатності. Зміни в оптичних параметрах поверхні матеріалу, які виникають під впливом лазерного опромінення, вносять фундаментальні зміни у процесах. Унікальність лазерного нагрівання проявляється у використанні коротких та надкоротких тривалостей лазерних імпульсів. Це призводить до необхідності розглядати температури окремо для електронної підсистеми та решітки. Стадія нагрівання матеріалів лазерним випромінюванням важлива для вивчення фізичних процесів, які відбуваються без руйнування матеріалу, наприклад, при зварюванні, термічній обробці, дифузії та інших. Для лазерної обробки матеріалів, яка включає руйнування та видалення певних його частин, стадія нагрівання є попередньою, але в той же час ключовою, оскільки її аналіз дозволяє передбачити умови руйнування.

3.2. Вплив теплового ефекту на фізичні властивості матеріалів

Під час впливу лазерного випромінювання на матеріали спостерігаються різноманітні явища та процеси, які змінюють оптичні та електричні властивості, структуру та фазовий склад матеріалу. Важливо виділити основні фізико-хімічні явища, які є ключовими для вирішення інженерних завдань у технології лазерного нагрівання матеріалів.

1. Плавлення: Під впливом лазерного випромінювання кристалічні або полікристалічні тверді тіла можуть нагріватися до температур плавлення. Ці температури значно варіюються для різних матеріалів і можуть бути від 500 К для низькоплавких металів (свинець, олово) до 3300 К для високоплавких металів (вольфрам, платина). Це впливає на кількість тепла, потрібну для нагрівання металу до температури плавлення і на теплоту плавлення - енергію, необхідну для розриву кристалічної решітки. Якщо продукти лазерного руйнування негайно видаляються з поверхні твердого тіла, процес називається лазерною абляцією. Теоретичний аналіз цього процесу допомагає визначити товщину розплавленого шару та тривалість плавлення до моменту випаровування матеріалу. Це важливо при лазерному зварюванні, як імпульсному, так і безперервному.

2. Випаровування: Рідка фаза, утворена під час плавлення твердого матеріалу, може перейти в парову фазу при досягненні температури випаровування. Процес випаровування відбувається, коли зону впливу випромінювання досягає необхідна теплота. Для деяких матеріалів відбувається твердотільний фазовий перехід - сублімація. Випаровування матеріалів може призвести до утворення мікротріщин, викиду частинок матеріалу та зміни його хімічної структури, особливо у випадку легко випаровуваних компонентів, які впливають на тиск у зоні нагрівання.

При аналізі лазерного випаровування матеріалів дуже важливо розглядати «енергетичну організацію» цього процесу. При низькій щільності потужності поглиненого лазерного випромінювання ($q \leq 104$ Вт/см^2), майже всі метали руйнуються через плавлення та абляцію, при цьому частка газової фази виробів руйнування є невеликою. Зі збільшенням потужності лазерного випромінювання температура матеріалу ($T \geq T_{пл}$) підвищується, що призводить до більшої участі випаровування у процесі руйнування. Фізична модель випаровування є складною, особливо складно врахувати частку розсіяного та поглиненого лазерного випромінювання у паровій хмарі над поверхнею матеріалу та врахувати взаємодію різних фаз у зоні опромінення.

3. Кристалізація: Вплив поглиненого лазерного випромінювання може змінити структуру, оптичні та електрофізичні властивості матеріалу в обробленій зоні. Наслідки цих змін залежать від властивостей матеріалу, потужності випромінювання, швидкості нагрівання та охолодження.

4. Термохімічні реакції: Лазерне нагрівання може посилити виникнення незворотних хімічних реакцій, що прискорюють руйнування матеріалу. Значний тепловий внесок екзотермічних реакцій, ініційованих у зоні нагрівання, може призвести до загоряння матеріалу, що може перетворитися на самостійний процес. Це може викликати окислення поверхні, відновлення металів, розклад складних сполук та створення нових матеріалів. Оптичні властивості матеріалів (особливо

поглинальна здатність) суттєво змінюються через зміни фізико-хімічних характеристик поверхні.

Взаємозв'язок цих фізичних процесів, що відбуваються під час впливу лазерного випромінювання на матеріали, проілюстровано на рис. 3.1.

Під час експозиції лазерному випромінюванню матеріал проймає кілька етапів: нагрівання, плавлення, випаровування, та охолодження. Після будь-якого з цих етапів може відбутися процес кристалізації, що впливає на оптичні властивості матеріалу, зокрема його поглинання при нагріванні та плавленні. Ця динаміка є особливо важливою у випадку напівпровідникових матеріалів. Крім того, в нагрітому матеріалі на його поверхні можуть активуватися термохімічні реакції, відбуватися деформація поверхні, а під час випаровування матеріалу можливі хімічні реакції у парофазному стані.

Рис. 3.1. Зв'язок фізичних процесів при впливі лазерного випромінювання на матеріали.

Поява оптичного пробою під час проникнення випромінювання через прозоре середовище починається на початковій стадії ланцюга. Наприклад, при опроміненні повітря може виникнути оптичний руйнівний ефект, такий як іскристість. Над поверхнею матеріалу формується плазма, яка складається з частинок, що

виникають внаслідок оптичного руйнування навколишнього середовища, а також з випарованих частинок матеріалу. Ця плазма, що утворюється, бере участь у поглинанні випромінювання та може фактично захищати ціль від його впливу. Очевидно, що набір фізичних процесів у зоні удару визначається рядом факторів: температурою, швидкістю нагрівання та охолодження матеріалу. Ці параметри, у свою чергу, залежать від геометричних та енергетичних властивостей лазерного випромінювання, характеристик оброблюваного матеріалу, маси опроміненого продукту, технологічної схеми переробки і т. д.

У майбутньому основними завданнями в аналізі лазерного нагріву будуть:

- оцінка швидкості нагріву та характеристики процесу нагріву (теплові характеристики);
- ідентифікація та аналіз фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час опромінення, та їх вплив на нагрівання.

3.3. Теплове випромінювання безпілотних літальних апаратів

Процес передачі тепла можна розділити на дві основні категорії. Перша категорія відображає ситуації, де структурні елементи навколишнього середовища, що перебувають у шляху теплопереносу, активно впливають на процес передачі тепла. Це включає теплопровідність та конвекцію. Друга категорія описує ситуації, коли середовище не бере участь у передачі тепла, і саме це явище відоме як теплове випромінювання. Таким чином, між процесами теплопровідності та конвекції, з одного боку, та тепловим випромінюванням - з іншого, існує суттєва відмінність.

Конвективний переніс теплоти та теплопровідність вивчались у режимі безперервного температурного поля, коли тепло переходить від твердого тіла до рідини або навпаки. Температурний градієнт завжди мав своє значення, за винятком випадків, коли дорівнював нулю.

Теплове випромінювання - це складний процес, оскільки перетворення енергії відбувається принаймні у два етапи: спочатку теплова енергія переходить у випромінювання (перше перетворення енергії) електромагнітних хвиль (фотонів), потім поширення цих хвиль, і нарешті, поглинання електромагнітних коливань поглинаючим середовищем або тілом (поглинання) становить друге перетворення

енергії. Теплове випромінювання розглядається як процес поширення поперечних електромагнітних хвиль, які виходять з джерела. Ці хвилі поширюються прямолінійно і, коли поглинаються будь-яким тілом або середовищем, знову перетворюються у тепло.

Електромагнітні коливання є носіями енергії випромінювання. Їх можна характеризувати за допомогою частоти ν (1/с) або довжини хвилі λ (м). Ці дві характеристики пов'язані між собою співвідношенням:

$$\lambda = \frac{c}{\nu},$$

де с - швидкість світла (у вакуумі с = $2{,}998 \cdot 10^8$ м/с).

Вплив випромінювання, коли воно потрапляє на речовину, залежить від довжини хвилі. Орієнтована класифікація різних видів випромінювання може бути наступною

Тип випромінювання (довжина хвилі, м):

космічне випромінювання……..до 10^{-13}

γ- випромінювання……..10^{-13}…10^{-10}

х- промені……$5 \cdot 10^{-12}$...$2 \cdot 10^{-8}$

ультрафіолетові промені…….....$2 \cdot 10^{-8}$...$4 \cdot 10^{-7}$

видимі (світлові) промені……$4 \cdot 10^{-7}$...$8 \cdot 10^{-7}$

теплові промені……10^{-7}...10^{-4}

радіохвилі……..> $2 \cdot 10^{-4}$

Промені, які виникають від зміни температури та фізичних характеристик тіл, відомі як теплове випромінювання (інфрачервоне випромінювання) (λ = 0.4...200 мкм) або теплова радіація.

Теплове випромінювання характерно для всіх тіл. Усі нагріті тіла випромінюють інфрачервоне випромінювання у навколишній простір. Коли ця

енергія натрапляє на інші тіла, частина з неї відбивається, частина поглинається, а частина проходить крізь тіло. Теплова енергія, яка поглинається тілом, знову перетворюється на тепло. Та частина, яка відбивається або проходить, потім може поглинутися або відбитися іншими тілами. Таким чином, після кількох поглинань та відбитті енергія, яка випромінюється, повністю розподіляється між оточуючими тілами. Отже, кожне тіло не лише безперервно випромінює, але й поглинає енергію.

Променистa енергія, яка проходить через будь-яку площину протягом одиниці часу, називається потоком випромінювання Q, (Вт).

Потік випромінювання, який виходить з одиниці площі поверхні в усіх напрямках напівсферичного простору, відомий як густина потоку випромінювання E (Вт/м^2) і обчислюється так:

$$E \equiv \frac{dQ}{dF},$$

де dQ - потік випромінювання через елементарну площину dF.

Звісно, що загальний променевий потік від усієї поверхні тіла (F) дорівнює

$$Q = \int_F E dF,$$

Потік випромінювання є характеристикою випромінювання, яка не розрізняє промені різних довжин хвиль. Ці величини відомі як інтегральні, а випромінювання різних довжин хвиль відоме як спектральне. Випромінювання з фіксованою довжиною хвилі відоме як монохроматичне. Розподіл променевої енергії за довжинами хвиль випромінювання описується спектральною інтенсивністю випромінювання E_λ, (Вт/м^3), яка визначається як похідна:

$$E_\lambda \equiv \frac{dE}{d\lambda},$$

де dE - густина потоку випромінювання із довжиною хвилі від λ до $\lambda+d\lambda$.

З цієї формули випливає зв'язок між інтегральним потоком та спектральною інтенсивністю:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \quad ,$$

Давайте розглянемо поняття, що описують взаємодію випромінювання з речовиною (рис. 3.2).

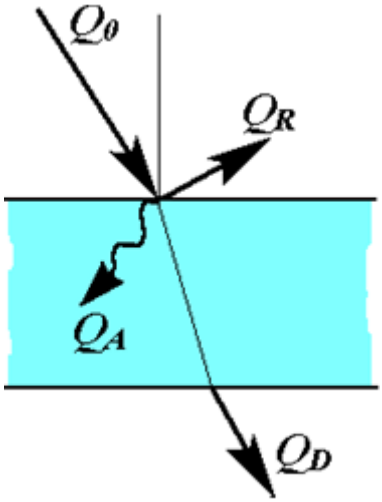


Рис. 3.2. Схема розподілу променистої енергії

Нехай з загального променистого потоку Q_0, що потрапляє на тіло, частина Q_A поглинається, частина Q_R відбивається, а частина Q_D проходить через тіло. Якщо у тілі немає внутрішніх джерел енергії, рівняння енергетичного балансу матиме вигляд:

$$Q_0 = Q_R + Q_A + Q_D.$$

Поділивши обидві частини цього рівняння на Q0, отримаємо співвідношення:

$$R + A + D = 1 \ , \qquad (3.1)$$

де $R \equiv \frac{Q_R}{Q_0}$ - коефіцієнт відбиття;

$A \equiv \frac{Q_A}{Q_0}$ - коефіцієнт поглинання;

$D \equiv \frac{Q_D}{Q_0}$ - коефіцієнт пропускання.

Перший доданок співвідношення (3.1) характеризує собою відбивну, другий - поглинальну, а третій - пропускну здатність тіла. Безрозмірні величини *R, A, D* змінюються в межах від 0 до 1. В залежності від їх значень, виділяють декілька межових (за оптичними властивостями) видів тіл

У природі немає тіл, що є абсолютно білими, чорними або прозорими. Коефіцієнти *R, A, D* залежать від природи тіла, його температури та спектра випромінювання, що надходить на тіло. Наприклад, для теплових променів чистий повітря є прозорим, але при наявності домішок водяної пари або вуглекислого газу, повітря стає напівпрозорим. Тверді тіла та деякі рідини практично непрозорі для теплового випромінювання, тобто в цьому випадку D = 0. Згідно з формулою (3.1), це призводить до співвідношення:

$$R + A = 1 \ . \qquad (3.2)$$

З цього випливає, що якщо тіло добре відбиває енергію, воно погано її поглинає.

Ми переважно будемо розглядати непрозорі тіла, що дозволить нам використовувати зв'язок (3.2) (наприклад, у формі $R = 1 - A$).

Важливим є стан поверхні. Гладкі, добре відполіровані поверхні мають значно кращі властивості відбивання, ніж шорсткі, незалежно від їх кольору. Крім взаємодії тіла з зовнішнім випромінюванням, тіло само випромінює енергію. Це приводить до введення ряду понять. Якщо на тіло ззовні не падають промені, з його поверхні відбувається випромінювання енергії (позначимо його густину E_1, (Вт/м^2)). Цей потік повністю залежить від температури та фізичних властивостей тіла. Відповідне випромінювання - це власне випромінювання тіла, а величина E_1 - випромінювальна здатність поверхні. Одночасно з боку інших тіл на тіло попадає променистa енергія в кількості E_2 - це випромінювання, що падає зовні (Рис. 3.3).

Частина падаючого випромінювання в кількості $E_{пог} = A_1 E_2$ поглинається тілом – це випромінювання, що поглинулося; інша частина – в кількості $E_{від} = R_1 E_2 = (1 - A_1) E_2$- відбивається – це відбите випромінювання (тут A_1 та $R_1 = 1 - A_1$ - відповідно, коефіцієнти поглинання та відбиття тіла).

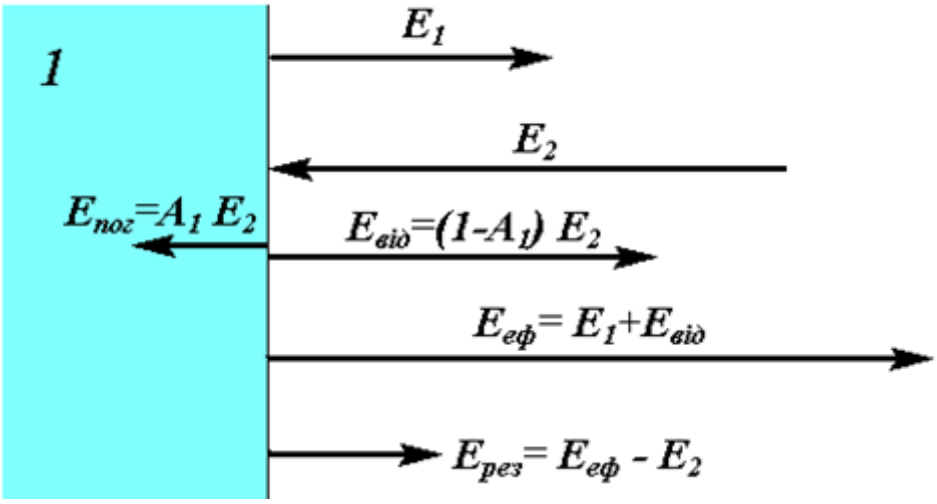


Рис. 3.3. Схема різновидів випромінювання

Власне випромінювання тіла в сумі з відбитим (тобто повне випромінювання, що йде від поверхні тіла) називається ефективним випромінюванням тіла і його питомий потік дорівнює

$$E_{еф} \equiv E_1+E_{від}= E_1+(1-A_1) E_2 .$$

Це фактичне випромінювання тіла, яке відчувається або вимірюється приладами. Питомий потік цього ефективного випромінювання перевищує питомий потік власного випромінювання тіла на величину $(1 - A_1)E_2$. Ефективне випромінювання залежить від фізичних властивостей тіла, що випромінює, та інших тіл навколо нього, а також від форми, розмірів та взаємного розташування тіл в просторі.

Результуюче випромінювання, описане як питомий потік ($E_{рез}$), представляє собою різницю між ефективним випромінюванням, що йде від тіла ($E_{еф}$) до нього (E_2). Також можна показати, що результуюче випромінювання дорівнює різниці між власним випромінюванням (E_1) та тією частиною зовнішнього випромінювання, що поглинається даним тілом ($E_{пог} = A_1 E_2$). Таким чином

$$E_{рез} \equiv E_{еф} - E_2= E_1-A_1 E_2 .$$

Величина $E_{рез}$ визначає результативний питомий потік енергії, який дане тіло передає оточуючим тілам у процесі променевого теплообміну. Якщо $E_{рез} < 0$, це

означає, що тіло отримує енергію в процесі променевого теплообміну. Якщо ($E_{рез} > 0$), тіло віддає енергію.

Отже, якщо $A = 1$, то $R = D = 0$,що свідчить про те, що всю падаючу променеву енергію повністю поглинає тіло, і таке тіло називається абсолютно чорним.

Якщо $R = 1$, то $A = D = 0$, що означає, що всю падаючу енергію повністю відбиває тіло, такі поверхні вважаються дзеркальними або, якщо відбиття розподілене рівномірно, абсолютно білими.

Якщо $D = 1$, то $A = R = 0$, що вказує на те, що всю падаючу променеву енергію повністю проходить через тіло, такі тіла називаються абсолютно прозорими (діатермічними).

Враховуючи, що для зменшення ваги БПЛА використовується алюміній, а максимальна температура електричної силової установки не перевищує 80°С, можна розрахувати можливість виявлення БПЛА типу «Квадрокоптер» інфрачервоною системою огляду повітряного простору.

3.4. Розрахунок теплового випромінювання квадрокоптера

При використанні різних видів безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що використовують тепловий пеленгатор, його виявляюча здатність зростатиме завдяки збільшенню розмірів повітряного об'єкта та використанню інших типів силових установок, таких як двигуни внутрішнього згоряння, що мають вищу робочу температуру (див. розділ 2).

Отже, вхідні дані для розрахунку включають:

- фронтальна площа квадрокоптера - 0,04 м2;
- максимальна температура електродвигуна - 80°С;
- матеріал корпусу - алюміній;
- максимальна дальність виявлення - 5000 м;
- порогова чутливість приймача випромінювання (ПВ) - 10-9 Вт.

Для виявлення об'єкта типу "квадрокоптер" у повітряному просторі через його випромінювання інфрачервоного діапазону потрібно виконати умову:

$$\Phi_{QC} = q\Phi_L \geq 0,$$

де Φ_{QC} - потік теплового випромінювання квадрокоптера, який спрямовується на приймач випромінювання; Φ_L - мінімальний потік випромінювання (обмеження) або порогова чутливість приймача випромінювання; q - відношення сигнал/шум, необхідне для заданої ймовірності виявлення.

Таким чином, сигнал завжди повинен перевищувати рівень шуму, тобто $q \geq 1$, отже, потік теплового випромінювання повинен бути більший за порогову чутливість приймача випромінювання $\Phi_{QC} > \Phi_L$.

Давайте визначимо енергетичну світність $M_{e(\lambda)}$ квадрокоптера, виготовленого з алюмінію. Відповідно до даних з табл. 3.1 [3], коефіцієнт теплового випромінювання полірованого алюмінію в діапазоні температур від 50 до 500 °C складає 0,05.

Таблиця 3.1

Коефіцієнти теплового випромінювання ε_T різних матеріалів (для напрямку, що збігається з нормою до поверхні)

Матеріал	Температура, °С	ε_T
Метали		
Алюміній		
- полірований	50…500	0,04…0,06
- із шорсткою поверхнею	20…50	0,06…0,07
- листовий	100	0,09

За законом зміщення Віна для температури силової установки коптера T=80°C, розрахуємо максимальну довжину хвилі:

$$\lambda_{max}=\frac{2898}{T}=\frac{2898}{(273+80)}=8.18 \text{ мкм}$$

При зменшенні температури силової установки, максимальна довжина хвилі буде зростати тому виберемо для розрахунків діапазон середніх хвиль λ= 8...14 мкм. Розрахуємо для цього діапазону відносні коефіцієнти довжин хвиль

$$X_\lambda=\frac{\lambda}{\lambda_{max}}, \qquad X_8=\frac{8}{8.18}=0.978, \quad X_{14}=\frac{14}{8.18}=1.711,$$

Відносні значення спектральної густини енергетичної світимості $z(x_\lambda)$ розраховані в таблицях [3] і складають:

$$z(0.978) = 0.2374, \qquad z(1.711) = 0.6294.$$

Відповідно до закону Стефана-Больцмана знайдемо енергетичні світність абсолютно чорного тіла три температурі T=80°C :

$$M_e=\sigma T^4=5,67\cdot10^{-8}\times(273+80)^4=880.4\ \frac{Bm}{м^2}$$

Визначимо енергетичні світність $M_{e(\lambda)}$ квадрокоптера в заданому діапазоні довжин хвиль:

$$M_{e(8...14)}=\varepsilon_T\sigma T^4\left[z\left(x_{14}\right)-z\left(x_8\right)\right]=\varepsilon_T M_e\left[z\left(0.978\right)-z\left(1.711\right)\right]=0.05\times880.4\times0.392=17.25\ \frac{Bm}{м^2}.$$

Звідси можна визначити потік випромінювання квадрокоптера на мінімальній відстані:

$$\Phi_{1QC} = M_{e(8...14)} \times S_{ц} = 17,25 \times 0,04 = 0,69\,Bm.$$

При проходженні через атмосферу та оптичну систему теплопеленгатора, потік випромінювання втрачає свою потужність, тому потік власного випромінювання об'єкта $\Phi_{впр}$ що потрапляє до приймача випромінювання, в основному являється функцією від температури об'єкта, відстані до приймача випромінювання, площі та інших складових і записується виразом:

$$\Phi_{впр} = \frac{\tau_{пр} S_{об} \varepsilon_{ц} S_{ц} \cos\alpha \sigma T_{ц}^{4}}{\pi L^{2}} K\left[z\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_м}\right) - z\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_м}\right)\right].$$

де $\tau_{пр}$ - коефіцієнт пропускання оптичної системи; $S_{об}$ – площа об'єктива приймача випромінювання; $\varepsilon_{ц}$ - коефіцієнт теплового випромінювання об'єкта; $S_{ц}$ - площа поверхні об'єкта; α - кут між нормаллю до поверхні випромінювання та лінією дальності; σ - постійний коефіцієнт Стефана-Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8}$ вт·м$^{-2}$К$^{-4}$); $T_{ц}$ - температура об'єкта; $K\left[z\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_м}\right) - z\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_м}\right)\right]$ - коефіцієнт використання випромінювання; L - відстань від об'єкта до приймача випромінювання.

Розрахунки представлені на рис. 3.4. показали, що потік власного випромінювання квадрокоптера на відстані 5000 м близький або нижче рівня порогової чутливості теплопеленгатора.

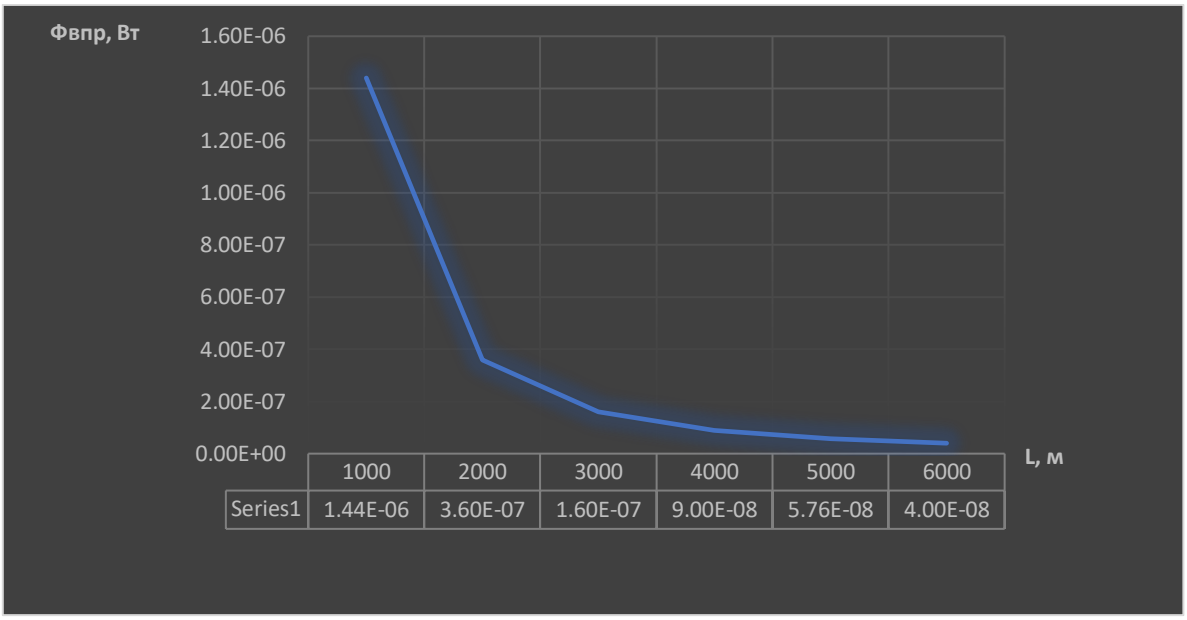


Рис. 3.4. Залежність потоку власного випромінювання квадрокоптера від відстані до теплопеленгатора

Тому для збільшення ймовірності виявлення квадрокоптера інфрачервоними засобами огляду повітряного простору потрібно збільшити його потік випромінювання. Це завдання можна вирішити двома способами: підвищенням температури квадрокоптера або використанням його як відбивальної поверхні для інфрачервоних хвиль з довжиною λ = 8–10 мкм.

Підвищення температури квадрокоптера можна досягти опроміненням його потужними лазерними імпульсами. Проте більшість складових частин силової конструкції квадрокоптера виготовлені з полірованого алюмінію, який погано поглинає інфрачервоне випромінювання та взагалі його не пропускає: $D=0$, $A \rightarrow 0$.

У такому випадку, враховуючи вираз $R + A = 1$, найбільше значення має коефіцієнт відбиття $R \rightarrow 1$. Тому доцільно збільшити потік потік випромінювання квадрокоптера шляхом відбивання інфрачервоного випромінювання з довжиною хвилі, близькою до власного випромінення.

В такому випадку загальний або результуючий потік випромінювання квадрокоптера складатиметься з його власного випромінювання та випромінювання, яке відбивається від нього $\Phi_{лпр}$:

$$\Phi_{рез} = \Phi_{впр} + \Phi_{лпр}$$

Розрахунок потоку випромінювання, відбитого від квадрокоптера можна представити наступним виразом:

$$\Phi_{лпр} = \frac{\Phi_n \tau_{пр} \tau_n \tau_a^2 S_{об} S_ц \rho_ц D_n^2}{4\pi L^4 S_n} K\left[z\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_м}\right) - z\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_м}\right)\right]$$

де Φ_n - світловий потік підсвілювача; $\tau_{пр}$ - коефіцієнт пропускання оптичної системи приймача; τ_n - коефіцієнт пропускання оптичної системи підсвітлювача; τ_a - коефіцієнт пропускання атмосфери; $S_ц$ - площа поверхні об'єкта; $\rho_ц$ - коефіцієнт дифузного відбиття обєкта; D_n^2 - діаметр оптики підсвітрювача; S_n - площа випромінювача.

Залежно від присутності гідрометеорів та пилу у повітрі, частина потоку випромінювання буде відбиватися від них. Це може призвести до сліплення приймача теплового випромінювання, що у свою чергу ускладнює отримання повного ефекту суми власного та відбитого потоку випромінювання.

Результати розрахунків потоку випромінювання, відбитого від безпілотних літальних апаратів (БПЛА), в залежності від відстані до теплового приймача, представлені на рисунку 3.5.

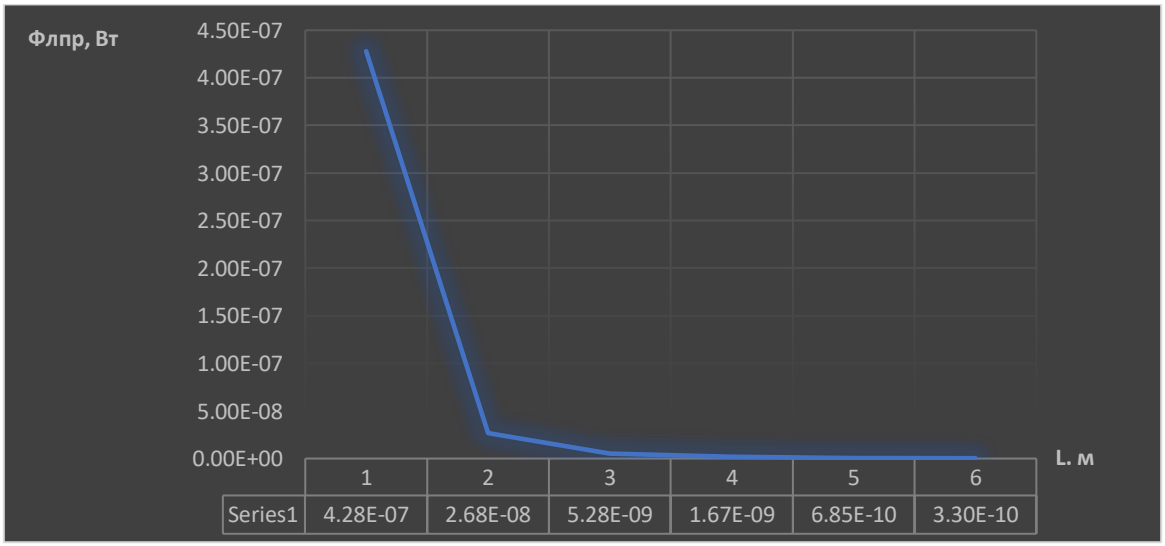
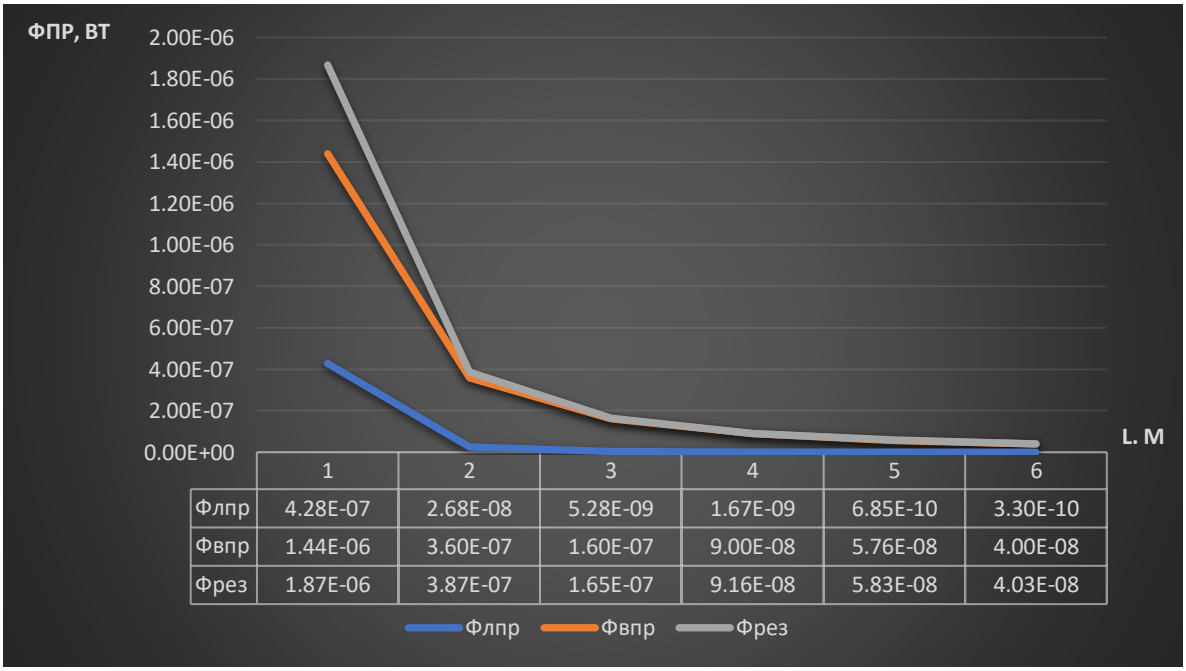


Рис. 3.5. Залежність потоку відбитого від БПЛА випромінювання від відстані до теплопеленгатора

Таким чином, використання лазерного променя інфрачервоного діапазону для освітлення низькотемпературних об'єктів, які випромінюють на довжині хвилі, відповідній до власного випромінювання квадрокоптера, показало, що оптимальним способом є використання цього методу на відстанях до 3 км від теплового приймача. Це дозволить вчасно виявляти перешкоди та уникати зіткнень.

Результати потоку власного випромінювання квадрокоптера та випромінювання, яке відбивається від нього від лазерного підсвітлювача, наведено на рисунку 3.6.



	1	2	3	4	5	6
Флпр	4.28E-07	2.68E-08	5.28E-09	1.67E-09	6.85E-10	3.30E-10
Фвпр	1.44E-06	3.60E-07	1.60E-07	9.00E-08	5.76E-08	4.00E-08
Фрез	1.87E-06	3.87E-07	1.65E-07	9.16E-08	5.83E-08	4.03E-08

Рис. 3.6. Залежність результуючого потоку випромінювання БПЛА від відстані до теплопеленгатора

Такий аналіз виявив, що навіть на відстані більше 6000 метрів рівень результуючого випромінювання перевищує порогову чутливість приймача інфрачервоного випромінювання. Це дозволяє ефективно виявляти БПЛА на великих відстанях, які достатні для проведення маневрів та уникнення зіткнень (див. рисунок 3.7).

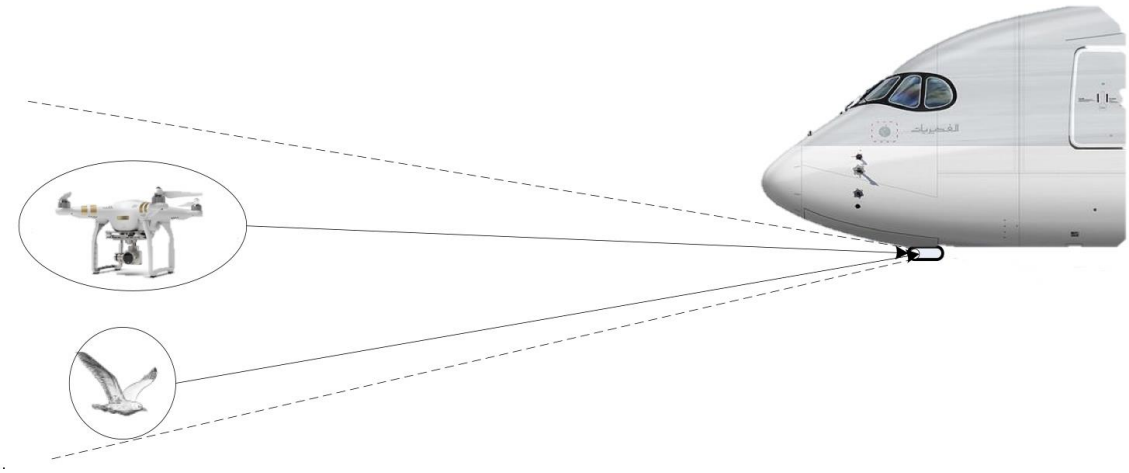


Рис. 3.7. Схема функціонування системи попередження зіткнень

із орнітологічними та малорозмірними об'єктами

Висновок: Отже, використання інфрачервоного лазерного прожектора допоможе освітлити всі об'єкти у напрямку руху повітряного судна за допомогою вузького променя, що збільшить їх випромінювальну енергію та дозволить виявити їх за допомогою інфрачервоних систем для запобігання зіткнень. Крім того, лазерне випромінювання відлякує птахів, що перебувають у зоні дії, та активна система попередження зіткнень інфрачервоного діапазону дозволить виявити планери та мотодельтаплани, які також характеризуються низькими швидкостями польоту та відсутністю відповідачів систем керування повітряним рухом.