

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

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ С.В. Павлова
«__» _____ 2022

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ
БАКАЛАВР ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173
«АВІОНІКА»

**Тема: «Інфрачервоні датчики системи запобігання зіткнень літака з
об'єктами в польоті»**

Виконавець:	_____	А.О. Волошко
	(підпис)	
Керівник:	_____	О.О. Чужа
	(підпис)	
Нормоконтролер:	_____	В.В. Левківський
	(підпис)	

Київ 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ С.В. Павлова

« ___ » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Волошко Анастасія Олегівна

- 1. Тема дипломного проекту:** «Інфрачервоні датчики системи запобігання зіткнень літака з об'єктами в польоті», затверджена наказом ректора від «04»квітня 2022р. № 352/ст.
- 2. Термін виконання роботи:** з 16.05.2022 р. по 19.06.2022 р.
- 3. Вихідні дані роботи:** небезпека зіткнень літаків у повітряному просторі, сигналізатори небезпечних зближень, системи попередження зіткнень, літаковий відповідач КПП, 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	16-22.05.2022	
2	Підготовка та написання розділу 1	23-27.05.2022	
3	Підготовка та написання розділу 2	28-31.06.2022	
4	Підготовка та написання розділу 3	01-10.06.2022	
5	Перевірка на плагіат, оформлення та отримання рецензії	11-14.06.2022	
6	Підготовка презентації та доповіді	11-14.06.2022	

8. Дата видачі завдання «16»травня 2022 р.

Керівник дипломної роботи

Чужа О.О.

Завдання прийняла до виконання

Волошко А.О.

РЕФЕРАТ

Загальний обсяг пояснювальної записки до дипломної роботи на тему «Інфрачервоні датчики системи запобігання зіткнень літака з об'єктами в польоті» складає 73 сторінок, 36 рисунків, 4 таблиці, 11 використаних джерел.

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

Об'єкт дослідження: процес дослідження запобігання зіткнень літака з об'єктами в польоті.

Предмет дослідження: інфрачервоні датчики системи запобігання зіткнень літака з об'єктами в польоті.

Мета роботи: дослідити інфрачервоні датчики системи запобігання зіткнень літака з об'єктами в польоті, з урахуванням особливостей його експлуатації.

Методи дослідження: проведення дослідження датчиків, аналіз системи запобігання зіткнень літака з об'єктами в польоті, обробка літературних джерел.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1	9
1.1. Небезпека зіткнень літальних апаратів у повітряному просторі	9
1.2. Системи запобігання зіткнення літаків у повітрі	12
1.3. Система попередження зіткнень TCAS	14
1.4. Система попередження зіткнень БПЛА.	21
1.5. Орнітологічна безпека польотів повітряних суден.....	25
1.6. Технічні засоби захисту повітряного простору аеропортів.....	28
1.7. Висновки до розділу	32
РОЗДІЛ 2	33
ДОСЛІДЖЕННЯ ДАТЧИКІВ ТЕХНІЧНОГО ОГЛЯДУ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ.....	33
2.1. Аналіз датчиків технічного зору систем огляду повітряного простору..	33
2.2. Інфрачервоне випромінювання повітряних суден із тепловими двигунами	44
2.3. Вплив атмосферних перешкод на розповсюдження інфрачервоного випромінювання	45
2.4. Висновки до розділу	49
РОЗДІЛ 3	50
ІНФРАЧЕРВОНІ ДАТЧИКИ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ПІД ЧАС ПОЛЬОТУ	50
3.1. Лазерний нагрів матеріалів.....	51
3.2. Вплив теплового ефекту на фізичні властивості матеріалів.....	54
3.3. Теплове випромінювання безпілотних літальних апаратів.	58
3.4. Висновки до розділу.....	71
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73

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

Протягом останніх кількох десятиліть інфрачервоні датчики відіграють важливу роль в авіації. Світовий досвід переконує, що авіаційний транспорт вважається одним із найбезпечнішим у світі.

Підтримка високого рівня безпеки польотів значною мірою пов'язана з вирішенням проблеми запобігання небезпечним підходам і зіткненням літаків з іншими повітряними об'єктами. Вирішення цього завдання покладається в першу чергу на диспетчерську службу системи керування повітряним рухом та на інші служби підтримання безпеки польотів (наприклад: орнітологічна служба та служба безпеки повітряного простору аеропорту). Однак з постійним збільшенням інтенсивності повітряного руху диспетчерській службі управління повітряним рухом (КПР) доводиться стикатися з дедалі зростаючими труднощами в запобіганні небезпечного зближення повітряних суден з іншими об'єктами в повітрі.

Найбільш поширені випадки небезпечних зближень і зіткнень повітряних суден з повітряними об'єктами включають: небезпечні зближення з іншими повітряними суднами, а також небезпечні зближення або зіткнення з повітряними об'єктами, на яких немає засобів реагування управління повітряним рухом, якими найчастіше є птахи і безпілотні літальні апарати.

Кількість безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різних типів і призначень у світі стрімко зростає, що призводить до збільшення ризику зіткнення з рухомими об'єктами, особливо небезпечними в авіації. Зокрема, безпілотники цивільного призначення легко доступні для громадськості і здатні переміщатися з високою швидкістю, що в поєднанні з їх невеликими розмірами ускладнює їх виявлення. Вони представляють новий ризик як для людей, так і для об'єктів на землі, а також для авіації, де можливі зіткнення в повітрі становлять загрозу для пасажирського транспорту.

Орнітологічна небезпека повітряного руху сьогодні перевищує кількість зіткнень з безпілотниками. Однак кількість безпілотних літальних апаратів інтенсивно зростає, так що ризик зіткнень також зростає.

Для запобігання зіткнення літака з об'єктами в польоті було розроблено систему TCAS (Traffic Collision Avoidance System). Система TCAS являє собою бортову систему, призначену для підвищення рівня безпеки польоту і виконує роль «останнього засобу» з виявлення загрози зіткнення літака з іншими ПС, оснащеними радіолокаційними відповідачами типу «RBS» (режими «А» та «С») або типу «S» (режим «S»), і подання рекомендацій щодо виконання маневру у вертикальній площині для запобігання можливому зіткненню, а також індикації вертикальної швидкості.

Крім того рух будь-якого сучасного повітряного судна неможливий без застосування двигуна який являє собою теплову машину, а отже випромінює хвилі інфрачервоного (ІЧ) діапазону. Також, окрім двигунів хвилі ІЧ діапазону випромінюють також нагріті частини фюзеляжу, тому найбільш доцільно застосовувати в TCAS інфрачервоні датчики.

Наскільки нам відомо, жодне попереднє дослідження не досліджувало інфрачервоні датчики системи запобігання зіткнень літака з об'єктами в польоті.

Саме тому основною метою даної дипломної роботи є дослідження інфрачервоних датчиків в системі TCAS.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НЕБЕЗПЕЧНИХ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЗАПОБІГАННЯ ЗІТКНЕНЬ

1.1. Небезпека зіткнень літальних апаратів у повітряному просторі

Безпека повітряного руху є необхідною умовою для виконання будь-якої модифікації або проектування системи організації та управління повітряним рухом, хоча звісно основною причиною для вдосконалення системи є необхідність збільшення її пропускної здатності. Основним показником безпеки повітряного руху є ризик зіткнення літаків. Центральне місце в системі прийняття рішень при контролі й управлінні повітряним рухом займає виявлення потенційно конфліктних ситуацій. На сьогодні відома велика кількість методів і алгоритмів виявлення конфліктних ситуацій, розроблених як для бортових систем керування польотом, так і наземних систем управління повітряним рухом. Ряд методів був реалізований в реальних системах.

Незважаючи на це, на даний момент продовжується інтенсивне дослідження і розробка більш досконалих методів виявлення конфліктних ситуацій, що мають кращі характеристики. Актуальність цієї проблеми пов'язана також з перспективою переходу на нові концепції організації повітряного руху, наприклад, такі, як “Free Flight” (“Вільний політ”), які дають екіпажам повітряних суден більш вільний вибір траєкторії польоту, що неминуче потребує введення нових норм, технологій, процедур і критеріїв прийняття рішень. Особливістю розглянутої проблеми є те, що, крім прямого вирішення задачі підвищення якості виявлення потенційно конфліктних ситуацій у процесі контролю і керування повітряним рухом, використовувані критерії можуть становити методологічну основу для оцінки безпеки повітряного руху для всієї системи організації повітряного руху.

Проблема зіткнень літальних апаратів виникла з самого зародження авіації. І хоча використання простору має чітку організацію і контроль, в небі як і раніше відбуваються різні інциденти, які можуть призвести до зіткнення літальних апаратів.

В останні роки, згідно зі статистикою ІКАО, кількість авіаційних подій неухильно скорочується. Це робиться для підвищення надійності авіаційної техніки і бездоганної роботи служб управління повітряним рухом. У той же час існують фактори, які не дозволяють повністю уникнути аварійних ситуацій в повітряному просторі. До основних факторів відносяться:

- висока інтенсивність повітряного руху, тобто висока завантаженість повітряного простору повітряними суднами різних класів, від великих літаків до малих літаків;
- людський фактор (помилки служб штучного дихання та персоналу);
- несприятливі погодні умови;

- зіткнення повітряних суден у повітрі та з повітряними суднами та транспортними засобами на злітно-посадковій смузі;
- відсутність автономних систем запобігання зіткнень на борту.

Останні два фактора викликають найбільшу кількість катастроф, тому дуже важлива кількісна оцінка безпеки польоту допустимим ризиком зіткнень повітряних суден.

Ризик зіткнень Q залежить від ймовірності правильного визначення місця розташування літального апарату за допомогою навігаційної апаратури ($P_{\text{НАВ}}$) і ймовірності правильного контролю за польотом системою КПП ($P_{\text{КПП}}$):

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

Однак навіть з його допомогою надзвичайно ефективних і дуже надійних систем КПП неможливо забезпечити необхідну безпеку польоту, тому що до цих пір частина земної поверхні не охоплена зоною дії систем КПП. Крім того, існуючі системи КПП не дозволяють надійно управляти польотом на малих висотах і у важкодоступних районах земної кулі (гори, тундра, гори, океанські простори). Тому навіть в 1977 році технічна та економічна необхідність установки спеціальних автономних систем запобігання зіткнень (СПЗ) на літаках стала виправданою.

При наявності на борту СПЗ ризик зіткнень різко знижується, та стає рівним:

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

де $P_{\text{СПЗ}}$ – імовірність правильного вирішення задачі попередження зіткнень бортовою СПЗ.

Найбільш поширеними випадками зіткнення повітряних суден з повітряними об'єктами є:

- небезпечні зближення з іншими повітряними суднами, оснащеними СПЗ;
- небезпечні зближення або зіткнень з БПЛА;
- небезпечні зіткнення з птахами (орнітологічна небезпека).

Найбільш важливою сучасною системою запобігання зіткнень літаків у повітрі є TCAS (англ. Traffic alert and Collision Avoidance System), це автономна бортова система запобігання зіткнень, сертифікована ІКАО, призначена для надання допомоги льотному екіпажу в запобіганні зіткнень в повітряному просторі. В активному стані система TCAS є засобом захисту від зіткнень з

іншими літальними апаратами, на яких встановлені, включені і працюють радіолокаційні відповідачі системи КПП сертифіковані ІСАО. Захист не надається в тому випадку, якщо система респондентів не відповідає стандартам ІСАО.

Основним недоліком сучасних систем TCAS є те, що вони не є автономними, тобто вимагають наявності радіоканалу для обміну інформацією та відповідного обладнання на інших повітряних суднах. У разі відсутності або непрацездатності обміну навігаційною інформацією (відповідачі ATC-RBS або ADS-B) системи попередження про зіткнення не зможуть виявити інші ПС, що збільшує ймовірність небезпечних зближень і зіткнень.

Безпека повітряного руху з метою порятунку життів людей є необхідною умовою для розробки будь-якого повітряного судна. Показником авіаційної безпеки є ризик зіткнення кількох повітряних суден у повітрі. Тому основне місце в системі прийняття рішень при управлінні і управлінні повітряним рухом займає виявлення потенційних конфліктних ситуацій. Зіткнення з безпілотними літальними апаратами можуть становити більшу загрозу для літака, ніж удари птахів.

Проблема зіткнень з птахами є одним з найважливіших напрямків сучасних досліджень. Орнітологічна безпека польотів в авіації боротьба з птахами виділяється як окремий вид безпеки польотів. Сучасне орнітологічне забезпечення-це комплекс заходів, які включають активний і пасивний захист повітряних суден від птахів, орнітологічну трансформацію аеропортів і зон аеропортів для зниження привабливості птахів, облік і тестування птахів при зіткненнях з повітряними судами, а також організаційні заходи безпеки аеропортів. Запобігання зіткненням з птахами-це особлива проблема, яка зростає з початку польоту і не вирішена донині.

1.2. Системи запобігання зіткнення літаків у повітрі

Попередження зіткнень – це комплекс загальних заходів екіпажів повітряних суден і пунктів керування повітряним рухом (КПР), спрямованих на зміну або збереження взаємного положення ПС у повітряному просторі з метою недопущення їх небезпечних зближень і зіткнень в повітрі. Зміна взаємного положення ПС здійснюється за рахунок маневрування, тобто навмисної зміни напрямку, висоти або швидкості польоту.

Розрізняють сигналізатори небезпечних зближень і системи попередження зіткнень.

Сигналізатори небезпечних зближень (СНЗ) призначені для видачі екіпажу сигналів (звукових або світлових) про можливу загрозу зіткнення з іншими ПС, яка визначається на основі вимірювання параметрів їх взаємного руху, наприклад, відстані між ними, різниці висот, кутових координат, тощо.

Системою попередження зіткнень (СПЗ) називається сукупність бортових радіоелектронних засобів та елементів літакового устаткування, що включає вимірювачі відносного положення ПС, пристрої обробки даних і команд та призначена для виконання завдань попередження небезпечних зближень і зіткнень ПС у повітрі. СПЗ додатково видає екіпажу інформацію про рекомендовані маневри для запобігання зіткнення на основі більш детального аналізу повітряної обстановки.

Основними завданнями СПЗ є:

- виявлення у навколишньому повітряному просторі всіх потенційно небезпечних з точки зору літаководіння повітряних суден;
- визначення відносного положення небезпечного літака по дальності, висоті та, за можливості, по азимуту;
- оцінка часу до можливого зіткнення;
- визначення доцільних маневрів для ухилення від зіткнення, а також моментів їх початку і закінчення;
- індикація екіпажу літака даних про повітряну обстановку та команд на виконання маневрів ухилення.

Конфігурація СПЗ і її структура залежать від призначення літака і завдань, що вирішуються СПЗ. Основними засобами, що входять до СПЗ, є обладнання для вимірювання відносного положення літаків, джерела інформації про висоту польоту і напрямку вектора швидкості, обчислювальний пристрій, засоби індикації і управління (рис. 1.1).

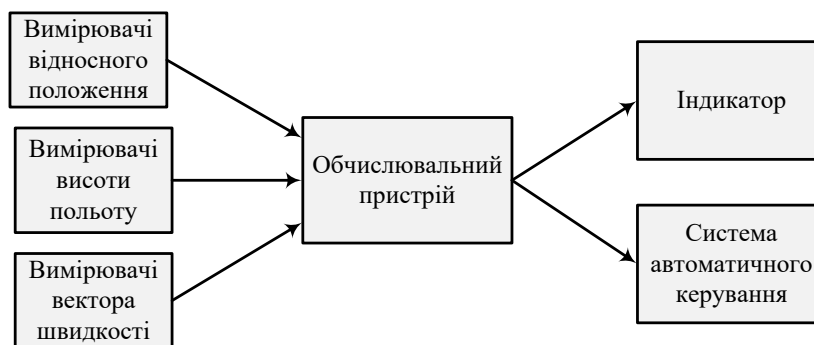


Рис. 1.1. Структурна схема система попередження зіткнень

Для вимірювання відносного положення ПС можуть використовуватися радіодалекоміри з відповідачами, без відповідачів, бортові РЛС та інші засоби. Роль джерел інформації про висоту польоту і вектора швидкості можуть виконувати штатні бортові засоби (системи повітряних сигналів, інерціальні навігаційні системи, доплерівські вимірювачі швидкості та зносу). Обробка даних проводиться в спеціалізованому обчислювальному пристрої, що входить до складу СПЗ.

Сигнали управління надходять на спеціальні індикатори або на командні стрілки директорних приладів. При автоматичному керуванні сигнали управління подаються в систему автоматичного керування (в канали управління тягою двигунів і кутовими рухами літака).

Для визначення параметрів відносного положення і відносного переміщення літаків можуть вимірюватися відстані між літаками, швидкості зближення, курсові кути літаків, кути місця і висоти польоту. Також можна використовувати інформацію про параметри свого руху і руху небезпечного ПС, отриману по каналах обміну інформацією.

Результати вимірювань зазначених первинних параметрів обробляються в СПЗ за відповідними алгоритмами, в результаті чого формуються такі вторинні

параметри, необхідні для вирішення завдань СПС, як: дистанція, інтервал, перевищення, миттєвий промах, тощо.

1.3. Система попередження зіткнень TCAS

Проблема зіткнень літальних апаратів в повітрі стала відчутною ще в 50-х роках минулого століття. Коли стали відбуватися льотні події з масовою загибеллю людей, ІКАО була розроблена концепція, а потім міжнародні стандарти Бортової системи попередження зіткнень (Airborne collision avoidance system (ACAS)). З усіх розробок згідно з цією концепцією основне поширення набула система TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System)

Система *TCAS* являє собою автономну бортову систему запобігання зіткнень, сертифікована ІКАО та призначена для допомоги льотним екіпажам в запобіганні зіткнень в повітряному просторі. У активованому стані система *TCAS* являється додатковим засобом захисту від зіткнення з іншими літаками, на яких увімкнені і функціонують їх відповідачі радіолокаційної системи КІР або відповідачі режиму «S». Цей захист не забезпечується в тому випадку, коли увімкнена система відповідачів не відповідає стандартам *ІКАО*.

Система працює за принципом активної радіолокації в автономному режимі незалежно від будь-якого бортового навігаційного обладнання та наземних систем. *TCAS* здійснює контроль за іншими ПС, що знаходяться поблизу, шляхом запитування їх приймачів-відповідачів і оцінює ризик зіткнення. Вона опитує всі ПС, що перебувають навколо «свого» літака. Якщо відповідач «чужого» ПС працює в режимі «A» - в *TCAS* поступає інформація тільки про дальність і пеленг літака; при роботі відповідача в режимі «C» - додатково надходить інформація про висоту; при роботі відповідача в режимі «S» - «свій» та «чужий» літаки будуть обмінюватися інформацією про взаємну координацію дій у вигляді рекомендацій про зміну вертикальної швидкості та мовних повідомлень у гучномовець і в телефони авіагарнітури пілотів при виникненні небезпечних ситуацій. На сьогоднішній день існують декілька модифікацій системи, основними з яких є *TCAS I* та *TCAS II* версій: 6.04; 7.0; 7.1.

Принцип дії системи TCAS полягає у наступному. Система TCAS формує навколо літака захисну ділянку повітряного простору, що складається із двох частин: зона попередження «Warning Area» і зона підвищеної уваги «Caution Area» (рис. 1.2). Розміри цих зон змінюються залежно від висоти та швидкості польоту. Система забезпечує захист захисної ділянки від вторгнення в неї інших ПС виходячи з їх швидкості зближення, як по відстані, так і по висоті.

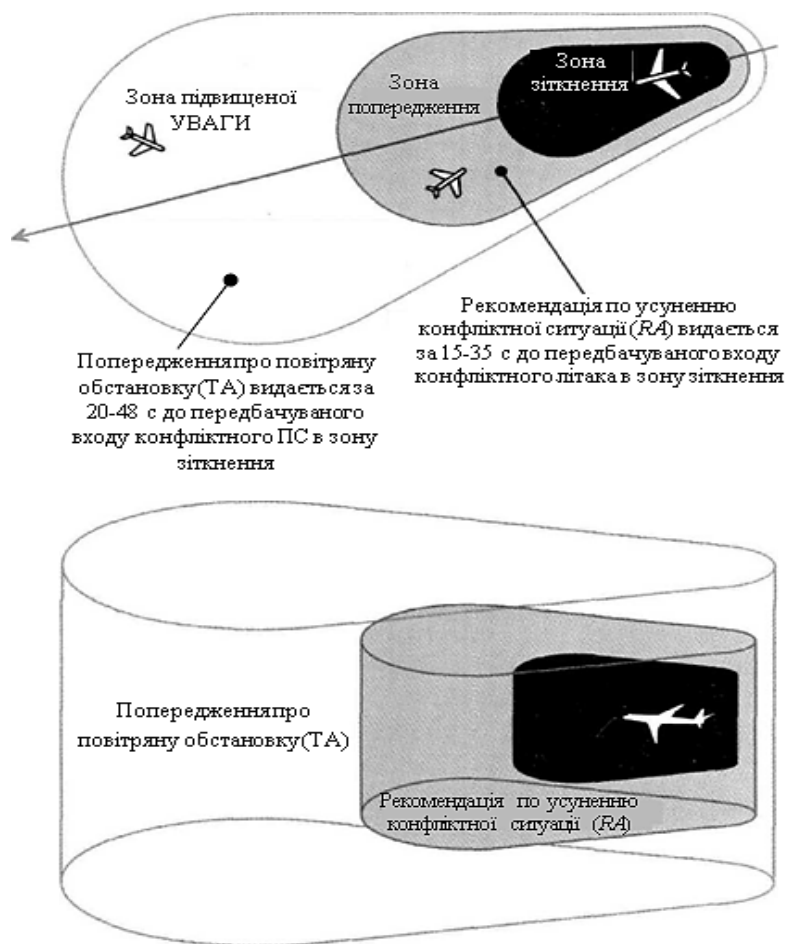


Рис. 1.2. Зони дії TCAS.

Система TCAS регулярно передає через всеспрямовану антену хаотичний сигнал на частоті 1090 МГц (рис. 1.2) і безперервно спостерігає за повітряним простором навколо «свого» літака ПС1 та стежить за сигналами відповідачів інших ЛА. «Чужий» літак ПС2, що потрапив у захисну зону TCAS і також обладнаний цією системою реєструє хаотичний сигнал та в свою чергу видає сигнал відповіді на частоті 1030 МГц. Таким чином виконується радіобмін інформацією між літаками. В результаті радіобміну інформацією, в якому також бере участь наземна станція, визначається відстань між конфліктуєчими ПС, їх радіальна швидкість і висота,

складається прогноз траєкторії польоту, на підставі чого виробляються команди по взаємно скоординованим маневрам, необхідним для запобігання зіткнення.

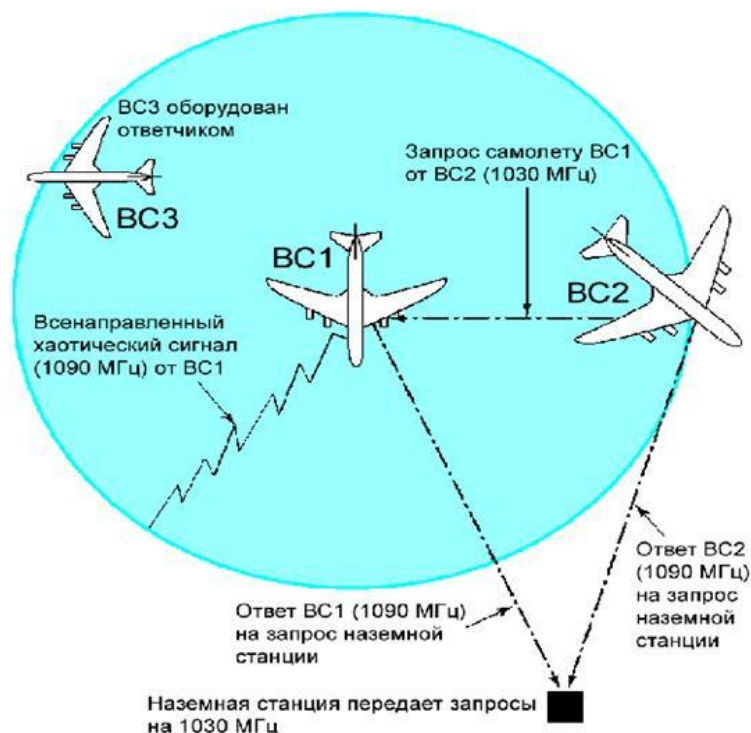


Рис. 1.3. Типова схема принципу дії TCAS.

Система TCAS працює за принципом обчислення часу до можливого зіткнення «т», тобто, незалежно від взаємної геометрії траєкторій конфліктуючих літаків в даний момент часу екіпажу видається попередження про повітряну обстановку (TA) та рекомендації щодо усунення конфліктної ситуації (RA) з одним і тим же запасом по часу.

Попередження про повітряну обстановку (режим TA)

Попередження про повітряну обстановку (TA) видається при виявленні конфліктуючого літака, для якого прогнозується, що йому буде потрібно 20-48 секунд для входження в захищену системою TCAS зону зіткнення.

Фактична відстань в момент видачі попередження варіюється з тієї причини, що вона залежить від швидкості зближення і висоти польоту конфліктного літака. Мовне повідомлення TA видається словами «TRAFFIC, TRAFFIC» (повітряний об'єкт, повітряний об'єкт). Відмітка такого літака з'являється на дисплеї VSI/TRA у вигляді суцільного кола бурштинового кольору, розташованого в місці, яке точно відображає дальність і пеленг цього літака, обладнаного системою TCAS

(рис. 1.4).

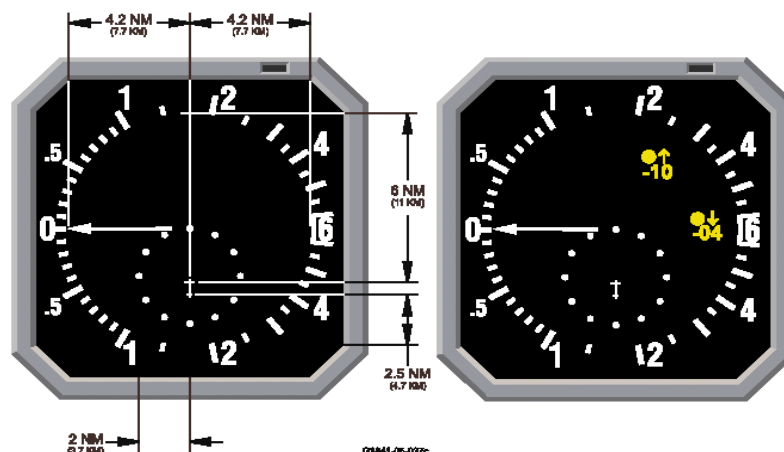


Рис. 1.4. Індикація системи TCAS на дисплеї VSI/TRA

У прилеглому полі даних вказується висотний поділ, повідомляється, чи знаходиться конфліктний літак вище або нижче літака, обладнаного системою TCAS 2000, а також зображується стрілка, спрямована вгору або вниз, яка показує напрямок вертикальної швидкості конфліктного літака в тому випадку, якщо вона перевищує 500 футів в хвилину.

Рекомендації щодо усунення конфліктної ситуації (режим RA)

Рекомендація щодо усунення конфліктної ситуації (RA) видається відносно конфліктного літака, для якого прогнозується, що йому буде потрібно 15-35 секунд для входу в захищену системою TCAS зону зіткнення. Фактична відстань в момент видачі цієї рекомендації змінюється з тієї причини, що вона залежить від швидкості зближення і висоти польоту конфліктного літака.

Якщо конфліктний літак входить в зону попередження, то системою видається рекомендація RA, яка відображається на дисплеї VSI/TRA у вигляді червоної дуги заборонених і зеленої дуги заданих вертикальних швидкостей (рис.

1.5), що 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 квадрата червоного кольору, розташованого в місці, що точно відображає дальність і пеленг щодо літака, обладнаного системою *TCAS 2000*. У представленому полі даних вказуються ті ж відомості, що і у випадку попередження про повітряну обстановку (ТА). Рекомендація *RA* може бути або корегувальною, або превентивною. Коригувальна рекомендація передбачає зміну вертикальної швидкості таким чином, щоб стрілка індикатора вертикальної швидкості вийшла із зони забороненої червоної дуги і перейшла в задану зелену дугу. Превентивна рекомендація обмежує вертикальну швидкість з тим, щоб зберігати вертикальне поділ, і відображається тільки дугою червоного кольору. Рекомендації щодо усунення конфліктної ситуації можуть бути посилені, пом'якшені або змінені на зворотні залежно від дій, необхідних для вирішення конфлікту. Будь-яка зміна повідомлення *RA* супроводжується як голосовим, так і візуальним оповіщенням.

Бортова апаратура топової системи *TCAS* складається із наступних компонентів (рис. 1.6). Всеспрямована нижня і спрямована верхня антени дозволяють визначати азимут і висоту польоту літака, що відповідає на запити приймально-передавального пристрою *TCAS*. Два відповідача містять по дві антени і пульт управління.

На обчислювальний блок системи *TCAS* (рис. 1.7) від відповідних приладів літака надходять дані про радіо та барометричну висоту, перебування літака в повітрі або на землі, про положення шасі, а також від пульта управління режимами роботи.



Рис. 1.6. Схема системи TCAS.

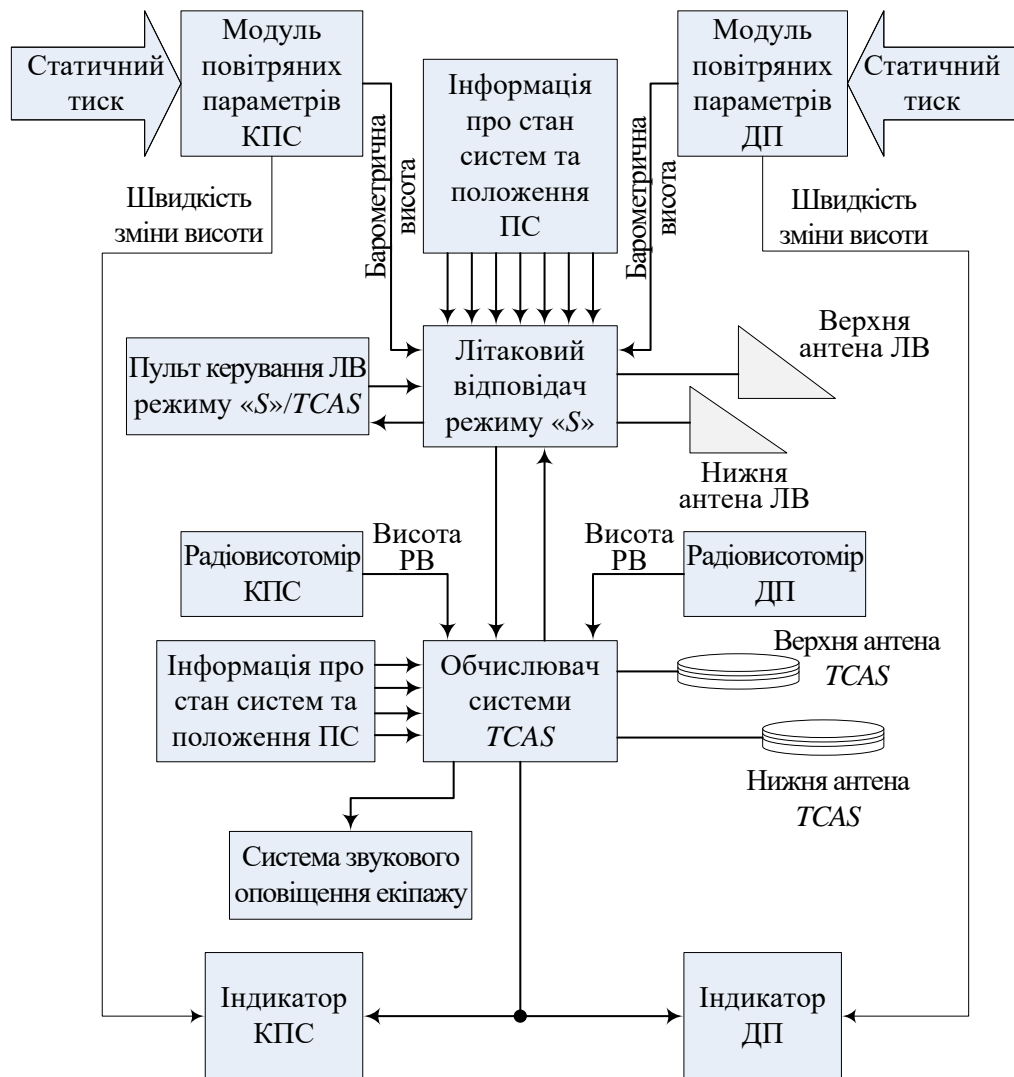


Рис. 1.7. Структурна схема TCAS 2000.

Обчислювальний блок опитує відповідачі інших літаків, обчислює їх місце розташування, відстежує їх траєкторію, передає різні попередження та рекомендації на дисплеї (*VSI/TRA*) або інші індикатори кабіни екіпажу, а також передає мовні повідомлення пілотові через розташовану в кабіні літака систему звукового оповіщення. Обчислювальний блок являє собою основу системи *TCAS*.

Система *TCAS* також включає в себе один (або два) відповідач режиму «*S*», який відповідає на запити, що надходять в режимі «*A*», режимі «*C*» і режимі «*S*» від радіолокаційних систем служби КПП, а також від інших літаків, обладнаних системою *TCAS*. Якщо відповідач «чужого» ПС працює в режимі «*A*» – в *TCAS* надходить інформація тільки про дальність і пеленг літака; при роботі відповідача в режимі «*C*» – додатково надходить інформація про висоту; при роботі відповідача в режимі «*S*» – обидва літака будуть одержувати інформацію на взаємну координацію дій.

Кожен літак, оснащений відповідачем режиму «*S*», має свою власну унікальну адресу, що дозволяє йому безпосередньо обмінюватися даними із сумісними системами. Ця адреса присвоюється конкретному літаку міжнародною організацією цивільної авіації (*ІКАО*). Така адреса заноситься в запам'ятовуючий пристрій кожного встановленого на борту відповідача режиму «*S*», що дозволяє системі *TCAS* безпосередньо зв'язуватися з конфліктуючими літаками, оснащеними відповідачами режиму «*S*», з якими їй необхідно скоординувати маневри з метою вирішення потенційних конфліктів. Адреса *ІКАО* не залежить від ідентифікаційних кодів «4096», які присвоюються рейсу службою керування повітряним рухом під час польоту.

Відповідач режиму «*S*» також передає дані від датчика барометричної висоти і з пульта управління в обчислювальний блок системи *TCAS*.

Система *TCAS* не може виявити конфліктний літак у випадку, коли бортовий відповідач режиму «*S*» вимкнений або працює в режимі «*STBY*» (режим гарячого резерву), а також літаки, оснащені відповідачами, які не відповідають стандартам *ІКАО*. Для уникнення зіткнень не можна покладатися виключно на вказівки системи *TCAS* або служби КПП.

Таким чином, всі сучасні системи попередження зіткнень потребують наявності радіоканалу для обміну інформацією та відповідним обладнанням на інших літальних апаратах, за відсутності радіозв'язку між повітряними суднами, неможливо виміряти їхні координати та параметри руху, тому ймовірність зіткнення значно зростає.

1.4. Система попередження зіткнень БПЛА.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) – це літальні апарати, які можуть літати та виконувати завдання без фізичної наявності пілота на борту (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Безпілотні літальні апарати

Безпілотні літальні системи представляють собою літальний апарат, систему зв'язку між БПЛА і наземним оператором або центром керування. Політ безпілотних літальних апаратів може здійснюватися з різними видами автономності, а саме від дистанційного управління людиною-оператором або автономно за допомогою бортових комп'ютерів.

На теперішній час, сфера застосування безпілотних літальних апаратів є досить широкою. Враховуючи той факт, що БПЛА є дистанційно керованими повітряними суднами, вони добре пристосовані для спостереження та виконання завдань в місцях, доступ до яких є ускладненим чи непрактичним для людини. Класифікація безпілотних літальних апаратів представлена на рис. 1.10.

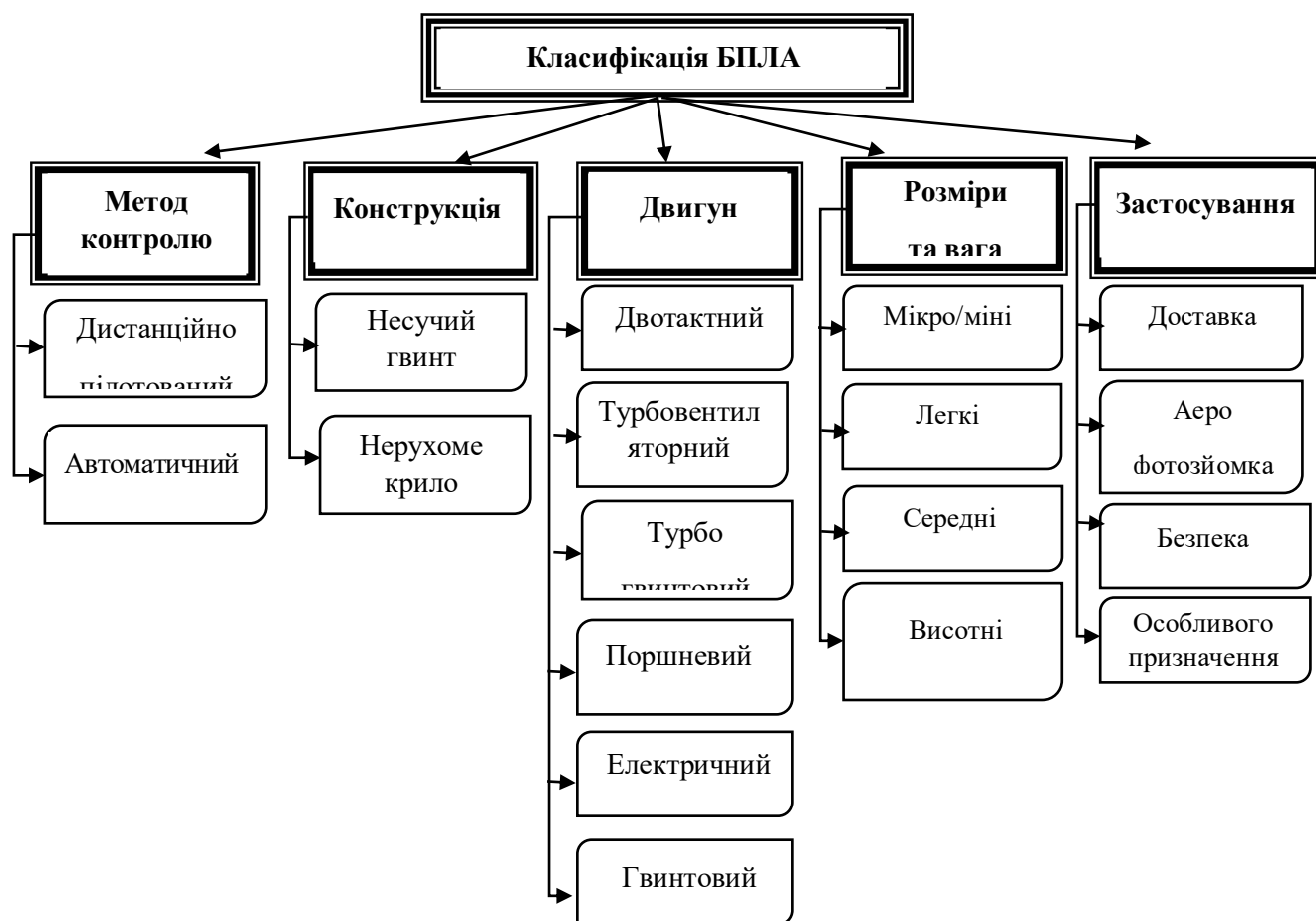


Рис. 1.10 Класифікація БПЛА

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	до 2,5 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.

Всі БПЛА оснащуються стандартним набором засобів авіоніки для керування та виконання поставлених завдань. Але лише середні та важкі БПЛА оснащуються системами запобігання зіткнень.

Небезпечні випадки наближення БПЛА з літками та з іншими безпілотними літальними апаратами можуть траплятись на великих швидкостях, тому покладатись на візуальний контроль ненадійно, тому була створена система виявлення та уникнення DAA (Detect-And-Avoid-System) для усунення небезпечних ситуацій.

Система складається з двохпанельної активної антени з електронним скануванням (рис. 1.11), яка дає можливість пілоту визначати та відстежувати ПС в заданому полі огляду. Бортовий радар дозволяє відслідковувати відразу декілька цілей, а також продовжувати фоновий пошук нових. Це є основною складовою бортового обладнання DAA.

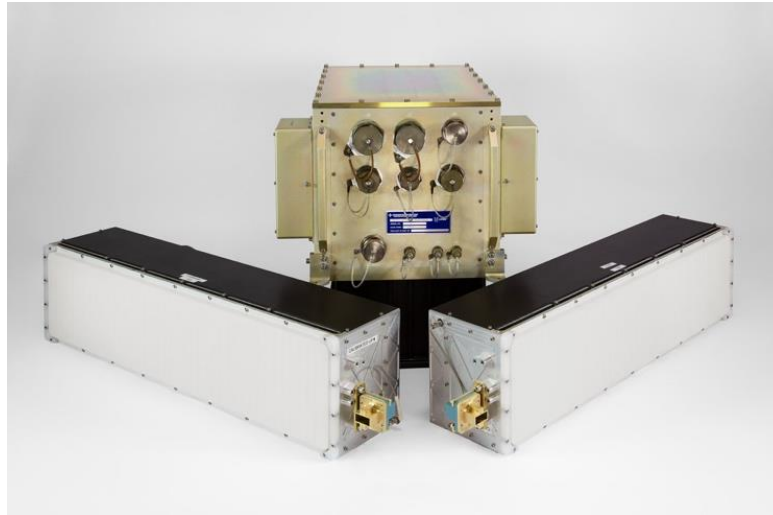


Рис. 1.11. Бортовий радар DAA

Функції DAA можна поділити на три групи:

- виявлення та спостереження сусідніх повітряних суден в разі потенційно небезпечних дій.
- ідентифікація небезпечних дій.
- запобігання небезпечних і конфліктних ситуацій, побудова безпечного маршруту ухилення та проведення маневрів ухилення.

DAA включає ряд підсистем, кожна з яких вирішує певні завдання:

- бортовий радіолокатор призначений для визначення необладнаних відповідачів ПС.
- система запобігання зіткнень TCAS, сумісна з технологіями цивільної авіації.
- супутникове автоматичне залежне спостереження-мовлення для трансляції інформації про політ та отримання аналогічних даних від інших учасників повітряного руху.
- система прогнозування та відображення інформації (Conflict Prediction and Display System).

Система виявлення та уникнення (DAA) дає змогу виявляти та уникати зіткнень із іншими повітряними суднами. Однак, швидкість літака є більшою від швидкості БПЛА, та маса радіолокатора складає близько 70 кг, що робить неможливим для встановлення такої системи на легких та надлегких БПЛА. Тому,

необхідно встановлювати систему запобігання зіткнень на більш швидкісному пілотованому ПС.

1.5. Орнітологічна безпека польотів повітряних суден.

Проблема протистояння між людьми та птахами в повітрі існує протягом довгого періоду. Вже на початку двадцятого століття, були зареєстровані перші випадки, які призвели до краху літаків та людських жертв. Але увага міжнародної спільноти до цієї проблеми була звернена лише в 1960 році. Зростання кількості польотів цивільної авіації зробило небом досить тісним, і тому інциденти з птахами ставали все дедалі частішими (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Птахи навколо літака

Орнітологічна безпека польотів передбачає ряд дій для зменшення ризику зіткнень літаків із птахами та іншими представниками дикої природи. Будь-який сучасний аеропорт є оснащений засобами відлякування птахів, але ефективні бортові засоби відлякування на безпечній відстані ще не знайдено; світлові засоби масово використовуються шляхом включення посадкових фар при посадці та зльоті в небезпечних зонах.

Зовнішнє навколишнє середовище негативно впливає на безпеку польотів, перш за все, можна виділити два фактори: метеорологічні умови та складні орнітологічні умови. Ось чому, орнітологічна безпека є досить важливою частиною безпеки польотів.

Удар при зіткненні із птахами є досить поширеним і може становити значну загрозу безпеці польоту. Для невеликих ПС, може бути завдано значної шкоди конструкції літака і всі ПС з реактивними двигунами можуть втратити тягу, при потраплянні птахів до двигунів. Зіткнення з птахами може відбуватись протягом будь якої фази польоту, але найбільш часто протягом зльоту, набору висоти, заходу та посадки через велику кількість птахів, які летять на низьких висотах.

Відповідно до статистики створеної від 2014-2019, вплив орнітологічного середовища на безпеку польоту в Україні є сезонним в природі та збільшується протягом літа через міграцію великої кількості птахів через територію України (рис. 1.13).

Зіткнення з птахами, кількість подій. За аеропортами (2014-2019рр.) з накопиченням													
Аеропорт	Счень	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. 1.13. Зіткнення літаків із птахами та кількість подій в аеропортах за 2014-2019 роки.

Найбільш небезпечними етапами польоту є зліт та посадка ПС, оскільки літаки знаходяться на висотах, доступних для польотів птахів, а також безпосередня близькість птахів до населених пунктів, що дає їм можливість більш легкого доступу до їжі (рис 1.14.).

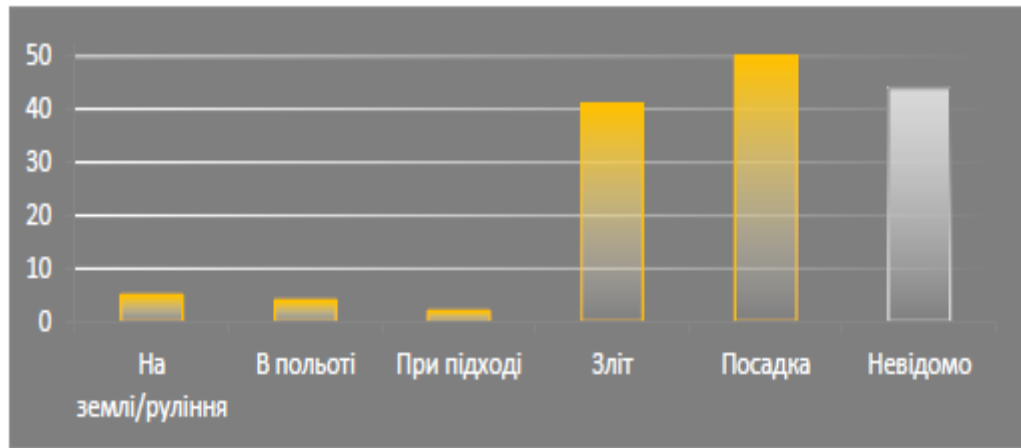


Рис. 1.14. Зіткнення з птахами на етапах польоту за 2014-2019 роки

Згідно з отриманою статистикою, найбільш схильними до пошкоджень, елементами ПС під час зіткнення з птахами є двигуни, крило, фари (рис. 1.15.).

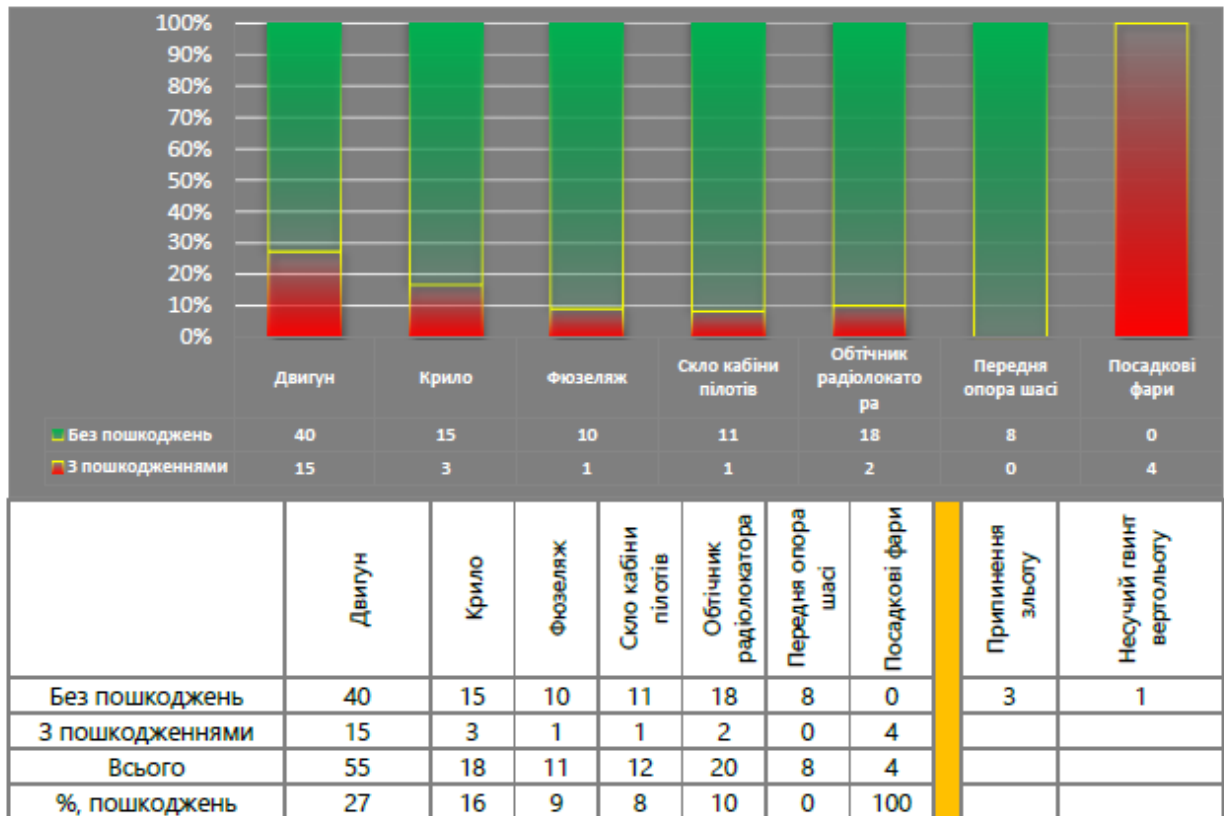


Рис. 1.15. Зіткнення з птахами, типи пошкодження ПС за 2014-2019 роки

1.6. Технічні засоби захисту повітряного простору аеропортів.

У даний час за повітряним простором аеропорту спостерігають служби безпеки аеропорту, за допомогою таких радіолокаційних засобів як Merlin та Robin avian radar, які є основними в моніторингу та виявленні небезпечної активності птахів та БПЛА в зоні аеропортів. Програмне забезпечення передбачає можливість відстежування за рухом птахів, БПЛА, повітряних куль чи інших повітряних об'єктів (рис.1.16.).



Рис. 1.16. Системи Merlin та Robin avian radar

Головною функцією радіолокатора виявлення птахів є визначення та виявлення птахів та попередження зіткнень із ними в зоні аеропорту. Інформація від радіолокатора передається до центру контролю аеропорту та до кабіни екіпажу (рис. 1.18). Тому пілоти можуть уникнути зіткнення та небезпечних ситуацій як із одним птахом, так із зграєю птахів.

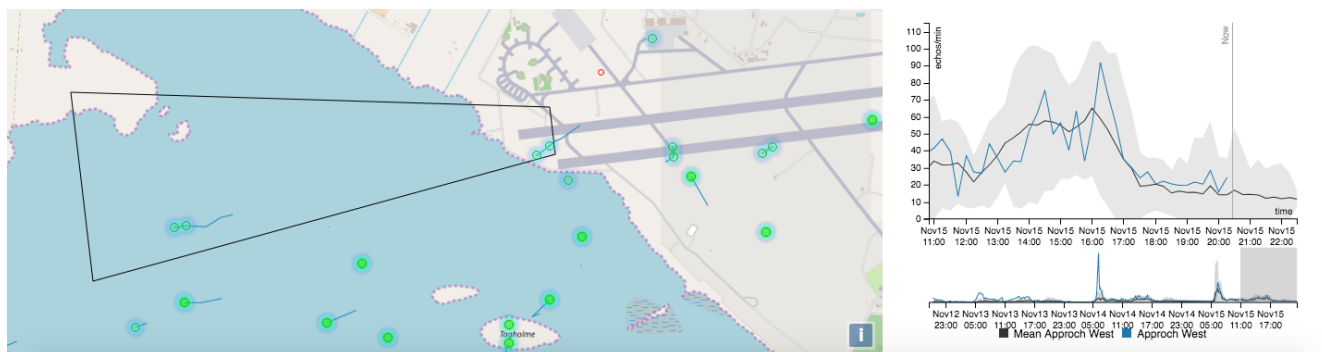


Рис. 1.17. Інформація від Robin avian radar

Радіолокатор виявлення птахів дозволяє змінювати можливості спостережень за часом та можливість розширення зони огляду за відстанню та висотою.

Система радіолокатора виявлення птахів складається з чотирьох модулів (рис. 1.18) :

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

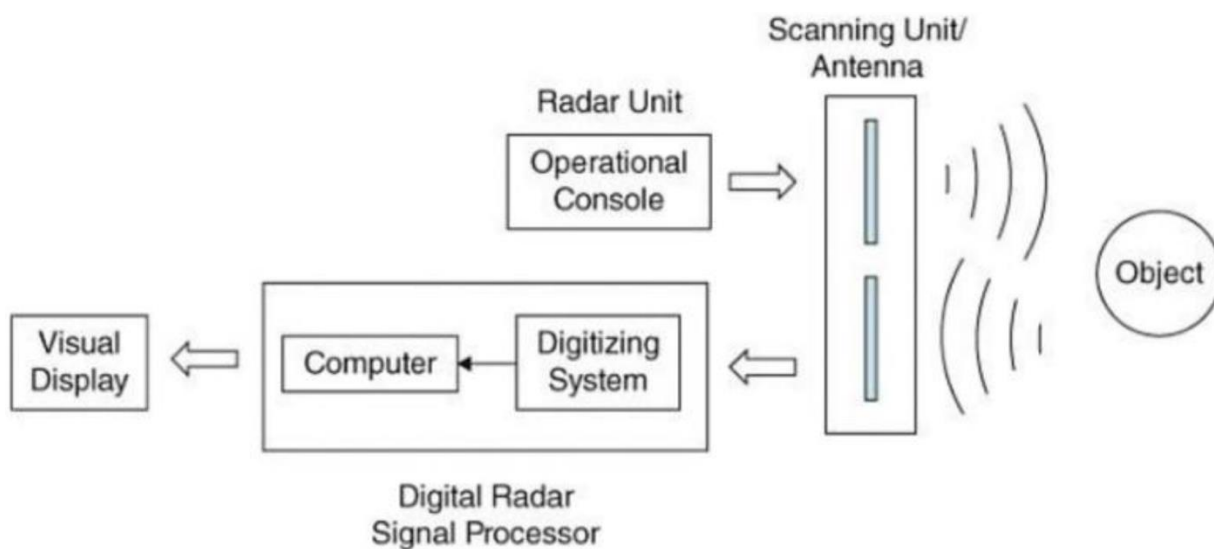


Рис.1.18. Схема радіолокатора виявлення птахів

Радіолокатор складається з пульта керування, який містить екран індикатора. Пульт використовується для управління параметрами живлення, а також діапазону, швидкості обертання антени та відображення характеристик положення індикатора в плані.

Система радіолокації випромінює електромагнітні хвилі (імпульси) або радіосигнали, які потім передаються через антену. Частина цих сигналів відбивається від навколишніх предметів і повертається до радіолокатора. Відбитий сигнал потім опрацьовується шляхом усунення шуму та інших перешкод і виявляє ціль, яку потім може супроводжувати.

Блок сканування складається із системи передавальних та приймальних антен. Антена виробляє направляючий промінь для сканування сусідньої зони. Антена повертається двома способами механічно та електрично у вертикальному та горизонтальному напрямках.

Існує два головних види антен:

- щілинна антенна решітка;
- параболічна антена.

Радіолокатор виконує наступні завдання:

- передача радіолокаційних зображень адміністрації аеропорту, отже допомагає керівникам польотів швидко реагувати на загрози невизначених літальних апаратів або птахів;
- визначення раптових небезпек від птахів, які не виявляються звичайними методами боротьби із ними;
- формування бази даних, які будуть використовуватись для прогнозування орнітологічної обстановки в аеропорту чи передаватись до інших аеропортів;
- визначення заходів по ослабленню наслідків орнітологічної небезпеки;
- виявлення взаємозв'язку між характеристиками середовища проживання та активністю птахів у небезпечних районах;
- розуміння природи руху та кількості птахів.

Подвійна конфігурація антен радіолокатора виявлення птахів Robin із однією вертикальною та другою горизонтальною антеною забезпечує тривимірне

покриття для злітно-посадкових смуг, коридорів посадки та вильоту. Вона експлуатується від рівня землі до висоти 15000 футів (4,5 км.) та азимутом 360° навколо аеродрому на відстань 7-8 і більше миль в залежності від рельєфу земної поверхні. Характеристика радіолокатора виявлення птахів Robin зображена в 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 радіолокатора з горизонтальною діаграмою направленості S-діапазону (2000-4000 МГц) та радіолокатора з вертикальною діаграмою направленості X-діапазону (8000-12000 МГц). Горизонтальний радар S-діапазону визначає присутність та кількість птахів за часом, включаючи їх положення, напрямок, швидкість руху та маршрут, на відстані до 10 кілометрів навколо, вдень та вночі. Радіолокатор X-діапазону покриває фіксовану площу приблизно 5км. Комбінуючи горизонтальне та вертикальне зображення радар Robin, створює просторове 3D зображення. Ця конфігурація зазвичай використовується в авіації для контролю пересування диких тварин та для формування захисту аеропортів від орнітологічної небезпеки.

1.7. Висновки до розділу

Аналіз небезпечних зближень і зіткнень повітряних об'єктів показав, що існує проблема безпеки польоту, а саме існує ризик зіткнення літака з об'єктами в польоті .

Широко відомі системи попередження зіткнень TCAS та DAA використовують транспондери (літакові відповідачі) ATC і ADS-B для контролю руху з можливістю запобігання небезпечних зближень і зіткнень. У той же час існують легкі міні і мікро БПЛА, у яких немає транспондерів, і птахи які будуть невидимими для сучасних СПЗ, для їх виявлення застосовують радіолокатори виявлення птахів, такі як системи Merlin та Robin Avian System, але тільки в зонах аеропортів.

Таким чином, під час польоту за межами зони аеропорту, екіпаж візуально перевіряє повітряний простір на наявність небезпечних повітряних об'єктів особливо на малих висотах. Тому щоб полегшити екіпажу виявлення небезпечних повітряних об'єктів у напрямку польоту, необхідно використовувати системи технічного огляду повітряного простору.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ДАТЧИКІВ ТЕХНІЧНОГО ОГЛЯДУ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Основним недоліком всіх сучасних пристроїв для небезпечних заходів на посадку і систем запобігання зіткнень в повітрі є те, що вони не є автономними, тобто вимагають радіоканалу для обміну інформацією та відповідного обладнання на інших повітряних судах. При відсутності або непрацездатності обміну навігаційною інформацією (відповідачі ATC-RBS або ADS-B) системи попередження про зіткнення не зможуть виявити інші ПС, що збільшує ймовірність небезпечних зближень і зіткнень.

Також рекомендується використовувати датчики систем автономного бачення, які дозволяють контролювати повітряний простір навколо повітряного судна і виявляти небезпечні повітряні судна на достатній відстані для виконання маневру, щоб уникнути зіткнення. Найбільш поширеними датчиками систем бачення, що надають інформацію про навколишній простір, є: системи, які отримують інформацію на основі аналізу електромагнітного поля в різних діапазонах довжин хвиль: оптичні датчики, інфрачервоні датчики, активні радіолокаційні системи, пасивні радіолокаційні системи, радіометричні датчики.

2.1. Аналіз датчиків технічного зору систем огляду повітряного простору

Найбільш поширеними датчиками систем технічного зору є: радіолокаційні, лазерні, телевізійні (яскравісні) та інфрачервоні (тепловізійні). **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 спектра оптичного випромінювання поділяється на такі наступні діапазони хвиль: граничний діапазон -15...300 мкм, дальній діапазон – 6...15 мкм, середній – 3...6 мкм і ближній діапазон – 0.75...3 мкм хвилі.

Основні переваги інфрачервоних датчиків:

- висока роздільна здатність;
- мала споживча потужність, розміри та вага;
- низький вплив атмосферних завад в діапазоні 8...14 мкм;
- охолоджені ІЧ приймачі мають високу контрастну чутливість та велику дальність виявлення (більше ніж 10км).

Недоліками інфрачервоних датчиків є:

- вплив атмосферних завад на ІЧ випромінювання в ближньому та середньому діапазонах;
- використовується лише пасивний метод отримання інформації, який не дозволяє визначати відстань до об'єктів випромінювання;
- охолоджені ІЧ приймачі мають високу споживчу потужність та інерційність при обробці інформації.

Найбільш відомими ІЧ системами в авіації є системи FLIR (Forward - Loading Infrared – інфрачервона система переднього огляду) це тепловізійні системи іIRST (Infrared Searchand Traking - ІЧ-система пошуку і супроводу) це теплотеплопеленгатори. Системи FLIR, що працюють в діапазоні довжини хвилі 8...13 мкм, стали основним пасивним засобом літаків, що забезпечують навігацію і виявлення перешкод. ІЧ-система пошуку і супроводуIRST (рис. 2.2) є ефективним пасивним засобом виявлення повітряних об'єктів на великих відстанях і в широких зонах, дальність її дії може бути порівнянна з дальністю дії деяких сучасних бортових радіолокаційних систем (РЛС) виявлення повітряних об'єктів.



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

Система IRST працює в середній і довгохвильовій ІЧ-області спектра в діапазонах довжин хвиль 3...6 і 8...12 мкм, де атмосферне ослаблення оптичних хвиль при нормальних умовах є прийнятним. Система виявляє найменші зміни температури об'єктів і фону, але функціонування її в значній мірі залежить від погодних умов. Під час дощу або густому тумані ефективність системи знижується, тому система IRST може бути ефективно використана тільки при ясній погоді. Система IRST виконує багато функцій бортової РЛС, до того ж вона в меншій мірі вразлива від засобів радіоелектронної протидії. Обидві системи здатні сканувати в широкій зоні огляду, виявляти і супроводжувати повітряні об'єкти. РЛС забезпечує точне вимірювання дальності, тоді як система IRST, будучи пасивною, не може визначати дальності до об'єктів. У той же час система IRS видає більш точну інформацію про азимут і кут місця та має більшу здатність до розпізнавання об'єктів.

Між ІЧ-системою FLIR, що використовується для виявлення наземних об'єктів та навігації, і системою IRST існує ряд відмінностей. Так, за рахунок більш низької частоти сканування система IRST забезпечує більш тривалий процес накопичення сигналів, необхідний для далекого виявлення.

Система FLIR (Рис. 2.3.) може працювати з полем зору, що не перевищує 30×40°, забезпечуваним індикатором на лобовому склі ЛА.



Рис. 2.3. Система FLIR та сформоване нею зображення.

Система IRST повинна мати широке поле зору близько $140 \times 60^\circ$, для того щоб здійснювати пошук об'єктів в якомога ширшому секторі огляду. Іншим важливою відмінністю цих систем є різні вимоги до цифрової обробки даних. Для системи FLIR може бути непотрібна ніяка обробка, якщо зображення відтворюється безпосередньо на індикаторі, або необхідна обробка невеликого обсягу. Для системи IRST необхідна швидкість обробки даних близько 30...40 млн. операцій в сек. для усунення перешкод і супроводу реальних об'єктів.

З технічної точки зору система IRST є більш складною, однак вона може виконувати функції звичайної системи FLIR і працювати як комбінована система FLIR/IRST для пасивного спостереження, супроводу і розпізнавання повітряних об'єктів та навігації.

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

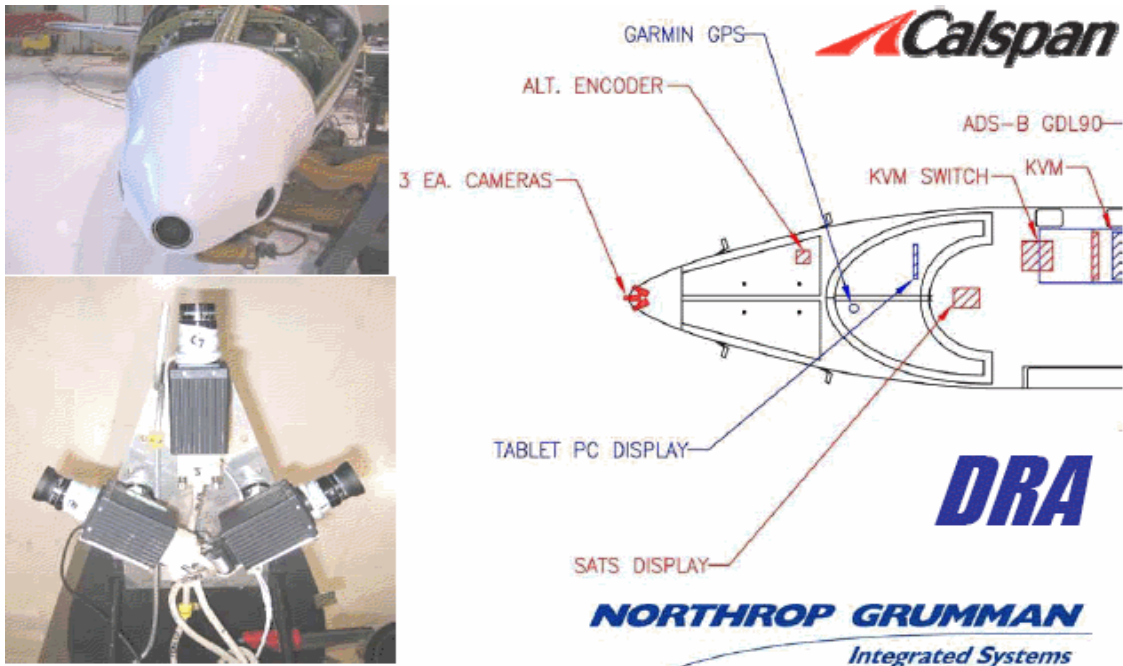


Рис. 2.4. Телевізійна система попередження зіткнень M2CAS.

Телевізійні системи мають такі наступні переваги:

- не потребують охолоджуючої системи;
- жодних проблем, пов'язаних із змінами температури;
- можливість накладення на зображення польотних даних.

Телевізійні системи мають деякі недоліки:

- наявність ефекту мерехтливого зображення;
- істотне обмеження освітленості;
- наявність властивості непрямого бачення, що призводить до необхідності відображення зображень спеціальним індикатором.

Лазерні локатори (Лідари). Принцип роботи лазерного локатора або лідара аналогічний принципу роботи звичайної активної РЛС і полягає в вимірі відстані до кожної точки простору і кутового напрямку на об'єкти, що перебувають в його полі зору в діапазоні від 0.1 ... 1000 мкм (рис. 2.5). Однак на відміну від звичайної РЛС, лазерний локатор має більш високу роздільну здатність, оскільки довжина робочої хвилі у нього значно менше. Це дозволяє здійснювати виявлення малорозмірних об'єктів, як наприклад дроти ліній електропередачі.

Подібно тепловізійним системам FLIR, лазерний локатор може працювати і при відсутності денного світла, проте на відміну від подібних систем, він може

забезпечувати отримання тривимірного зображення. У лазерному локаторі шляхом виділення доплерівського зсуву частоти імпульсних відбитих сигналів можна виявити рух об'єкта.



Рис. 2.5. Лазерний локатор.

Основним чинником, що обмежує можливості застосування лазерного локатора, є невелика дальність дії. Лазерне випромінювання значно послаблюється атмосферою. Максимальна дальність для випадку роботи в чистій атмосфері може досягати 10 км, однак при наявності хмар або димки дальність дії в загальному випадку відповідає дальності дії тепловізійної системи FLIR. До недоліків лазерних локаторів відносяться тривалість процесу виявлення об'єктів в тих випадках, коли огляду підлягає великий простір, і високі вимоги до точності супроводу об'єктів. Пояснюється це надзвичайно вузьким лазерним променем.

Радіолокаційні системи В *радіолокаційних* датчиках виділення ознак виконується на основі обробки сигналів, відбитих від радіоконтрасних об'єктів.

Радіолокаційні датчики (рис. 2.6) бувають активного або напівактивного типу.

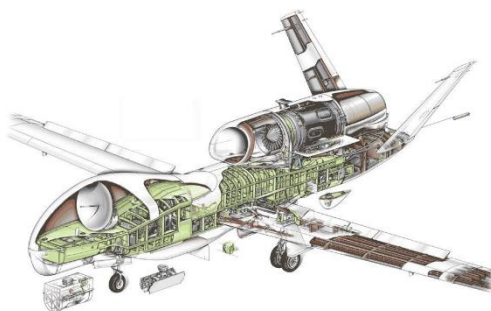


Рис. 2.6. Бортовий радіолокатор БПЛА Global Hawks

Найважливішим базовим елементом інтегрованих комплексів моніторингу навколишнього простору є РЛС. Особлива роль РЛС обумовлюється їх здатністю виявляти цілі на значно більших відстанях в порівнянні з ОЕС.

Пасивні **акустичні датчики** (рис. 2.7) виділяють необхідну звукову інформацію на тлі навколишнього шуму, але основним недоліком застосування є наявність у вихідному сигналі великого рівня паразитного шуму, і низька селективність.

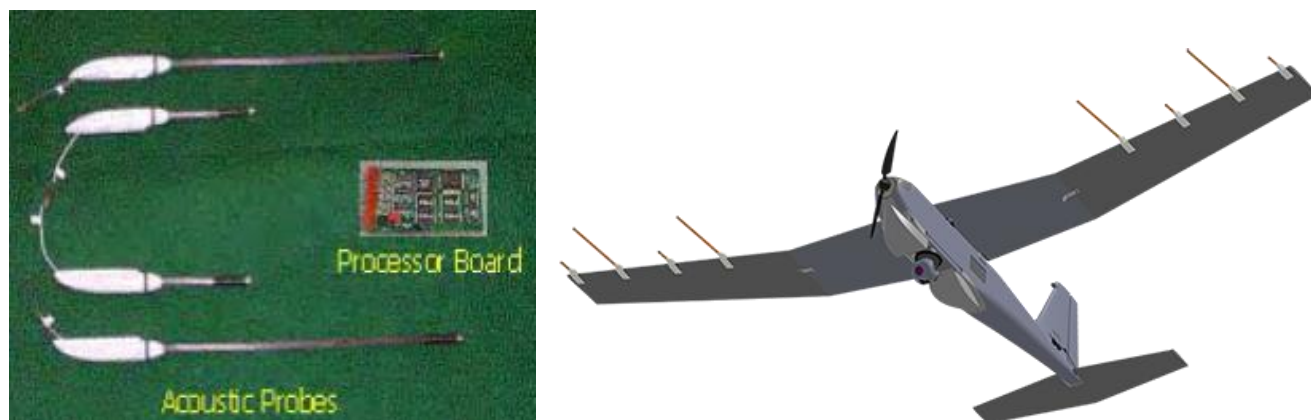


Рис. 2.7. Акустичні датчики

Таким чином, аналіз датчиків систем технічного зору для огляду повітряного простору, які можуть бути задіяні для виявлення повітряних об'єктів на борту повітряного судна призвів до наступних висновків:

- телевізійні датчики виділяють об'єкт на основі різниці яскравостей між ним та навколишнім середовищем тому мають малу роздільну здатність на великих відстанях та не працюють в умовах недостатньої видимості;
- радіолокаційні та лазерні датчики являються активними системами, що вимагають підвищеного енергоспоживання та додаткового місця розташування приймально-передавальних антен та об'єктів;
- акустичні датчики мають малу селективність та завадозахищеність;
- інфрачервоні датчики виявляють об'єкти, які мають тепловий контраст та можуть виявляти нагріті частини повітряних суден, на тлі навколишнього середовища, температура якого зменшується з набором висоти.

Тому, найбільш доцільно застосувати у якості датчиків первинної інформації систем попередження зіткнень пасивні інфрачервоні датчики або тепlopеленгатори.

2.2. Інфрачервоне випромінювання повітряних об'єктів

Рух будь-якого сучасного повітряного судна неможливий без застосування двигуна який являє собою теплову машину, а отже випромінює хвилі інфрачервоного (ІЧ) діапазону, які можуть бути зафіксовані датчиками системи технічного зору. Крім двигунів, хвилі ІЧ діапазону випромінюють також нагріті частини фюзеляжу повітряного судна, тому найбільш доцільно застосувати у якості датчиків первинної інформації систем попередження зіткнень пасивні інфрачервоні датчики датчики (англ. Infrared – IR sensor) або теплопеленгатори.

Основними перевагами інфрачервоних датчиків є можливість пасивного виявлення інших повітряних суден на відстанях до 50 км за їх тепловим зображенням від працюючих двигунів та нагрітих елементів фюзеляжу, що дозволяє визначати кут азимута та кут місця іншого літака, а також, за зміною потужності теплового випромінювання дає можливість визначати наближення «порушника» чи його віддалення. Крім того на основі аналізу інтенсивності та спектру інфрачервоного випромінювання є можливість визначити тип двигуна підвітряного судна: одноконтурний турбореактивний двигун (ТРД) на крейсерському режимі польоту передбачає температуру реактивного струменя 500-700°C, при зменшенні режиму роботи двигуна а отже і швидкості температура реактивного струменя знизиться до 350-450°C, такі двигуни можна виявити на дальності 30-50 км. Температура реактивного струменя двоконтурного турбовентиляторного двигуна нижче турбореактивного на 25% за рахунок проходження холодного повітря через зовнішній контур двигуна.

Нагріта частина повітряного судна випромінює ІЧ енергію, довжина хвилі якої визначається її температурою (рис. 2.8).

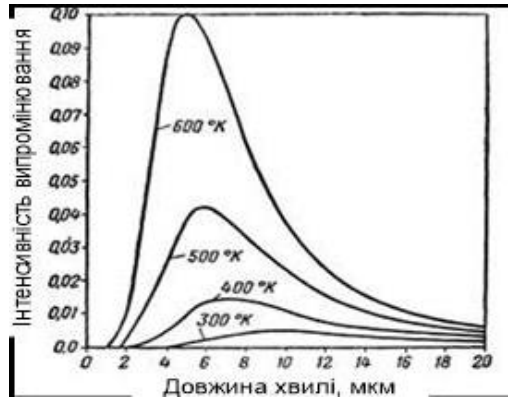


Рис. 2.8. Залежність інтенсивності ІЧ випромінювання від довжини хвилі та температури.

Із збільшенням температури об'єкта характеристики ІЧ випромінювання змінюються: довжина хвилі, що відповідає максимальній енергії випромінювання – зменшується, а повна енергія випромінювання збільшується в четвертій степені від температури об'єкта.

Таким чином, найбільш доцільно застосовувати в ІЧ датчиках систем попередження зіткнення діапазон хвиль 4-12 мкм.

Будь-які тіла випромінюють електромагнітні хвилі в широкому діапазоні частот. У ближній (0,76...3 мкм) і середній (3...6 мкм) зонах ІЧ-випромінювання потужність теплового (власного) випромінювання об'єктів значно менше потужності відбитого від об'єкта потоку сонячної енергії. З переходом в довгохвильову область ІЧ-діапазону потужність власного випромінювання об'єктів прирівнюється до потужності відбитої сонячної енергії. Величина енергії, яку випромінює будь-яке тіло з температурою T пропорційна відповідно до формули Стефана-Больцмана величиною T^4 .

Максимум енергії випромінювання тіл при температурі повітря влітку знаходиться в діапазоні 3-5 і 8-14 мкм. Чим вище температура тіла, тим більше випромінюється ІЧ енергія, а її максимум зміщується в бік більш коротких хвиль. Тому нагріті тіла за допомогою відповідних приладів можуть спостерігатися в повній темряві як в інфрачервоному, так і радіодіапазоні.

При оцінці випромінювання в інфрачервоному діапазоні необхідно враховувати теплопровідність матеріалів об'єктів спостереження. Нагріваючись від сонячних променів, вони до відбитого світла додають частку власного випромінювання. В діапазоні вище 3 мкм потужність власного теплового випромінювання об'єкта може перевищувати потужність відбитого їм світла. У зв'язку з цими властивостями в інфрачервоному діапазоні з'являється додаткова ознака - температура різних ділянок поверхні об'єкту по відношенню до температури фону.

2.2.1. Основні закони ІЧ випромінювання

Закон Кірхгофа. У точці поверхні теплового випромінювача при будь-якій температурі і будь-якій довжині хвилі спектральний коефіцієнт направлено випромінювання для заданого напрямку дорівнює спектральному коефіцієнту поглинання для протилежно спрямованого неполяризованого випромінювання. Інакше кажучи, чим більше енергії поглинає тіло, тим більше воно її випромінює:

$$M_{e\lambda 1}/\alpha_{\lambda 1} = M_{e\lambda 2}/\alpha_{\lambda 2} = \dots = M_{e\lambda n}/\alpha_{\lambda n} = M_{e\lambda \text{чт}}, \quad (2.1)$$

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

Закон Стефана-Больцмана. Енергетична освітленість чорного тіла пропорційна четвертому степеню абсолютної температури:

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

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

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

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

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

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

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

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

При $\lambda T < 3000 \text{ мкмК}$ 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

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

Де λ_{max} вимірюється в мікрометрах, а T - в кельвінах. На практиці часто це рівняння називають законом Голіцина-Віна, він вказує на те, що із збільшенням температури випромінювача максимум випромінювання зсувається вліво по спектру довжин хвиль λ , тому він називається також законом зміщення (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

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

λ_1 , мкм	λ_2 , мкм	Поверхнева густина випромінювання чорного тіла, Вт·см ⁻² , при його температурі, 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	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$2,01 \cdot 10^{-2}$	$3,34 \cdot 10^{-1}$
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. Інфрачервоне випромінювання повітряних суден із тепловими двигунами

Основними джерелами випромінювання ЛА з поршневіми двигунами є вихлопні патрубкі, відпрацьовані гази двигуна, що виходять з патрубків, і капоти двигунів. Потужність їх випромінювання визначається температурою, розмірами, коефіцієнтом випромінювання і повнотою згорання палива. Індикатриса випромінювання визначається також ступенем екранування тепло-випромінюваних поверхонь і обсягів іншими деталями літака.

Капоти двигунів мають порівняно низьку температуру ($90 \dots 100^\circ\text{C}$) і малий коефіцієнт випромінювання ($0,2 \dots 0,4$), так що енергія, випромінювання цим джерелом, відносно невелика.

Вихлопні гази поршневих двигунів містять велику кількість дрібних твердих частинок вуглецю, нагрітих до температури $1000 \dots 1100^\circ\text{C}$. Наявність їх обумовлена неповним згоранням вуглеводневих палив в двигунах внутрішнього згорання, що працюють, як правило, з недостатньо збагаченою повітрям сумішшю. Вихлопні гази випромінюють енергію у вигляді ряду спектральних ліній або вузьких смуг, включаючи смуги випромінювання парів води з довжинами волі $1,3$; $1,8$ і $2,7$ мкм і смугу випромінювання двоокису вуглецю в межах довжини хвилі $4,3$ мкм.

У загальному балансі енергії випромінювання літака з поршневим двигуном частка випромінювання капотів і вихлопних газів коливається від 35 до 45% . Інша частина припадає на випромінювання вихлопних патрубків, температура яких сягає $650 \dots 800^\circ\text{C}$ поблизу колектора, знижуючись по зрізу, до $250 \dots 350^\circ\text{C}$. Вихлопні патрубкі двигунів розташовуються під центропланом літака або над ним, тому випромінювання нагрітих патрубков може відбуватися як у верхню, так і в нижню півсфери. Як матеріал для виготовлення вихлопних патрубків застосовується жаротривка сталь, яка в окисленному стані має коефіцієнт випромінювання близько $0,85$.

На рис. 3.9 зображені індикатриса випромінювання літака з двома поршневіми двигунами Piper PA-31. Наявність максимумів в наведених кривих (сила ІР випромінювання до 1700 Вт/ср в горизонтальній площині та до 120 Вт/ср

в вертикальній площині) пояснюється характером розташування вихлопних патрубків і формою струменів відпрацьованих газів двигунів.

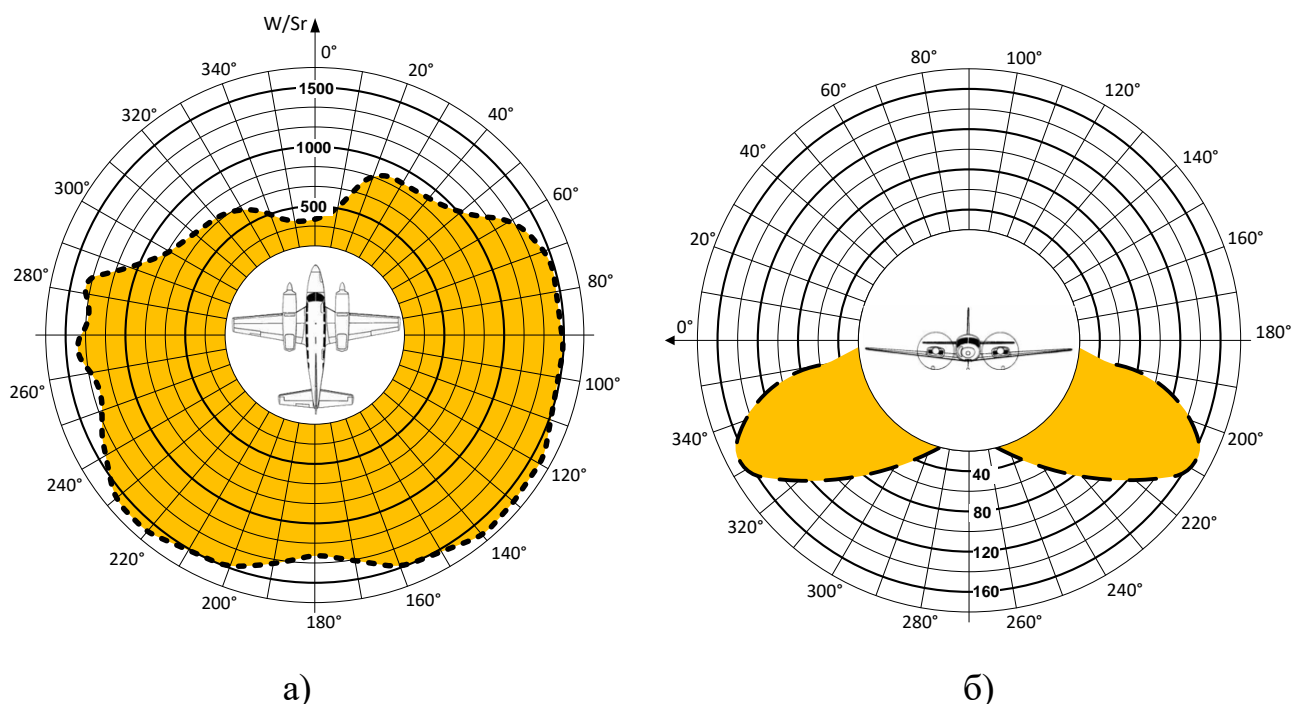


Рис. 3.9. Індикатриса випромінювання літака Piper PA-31 в горизонтальній (а) та вертикальній (б) площинах

2.3. Вплив атмосферних перешкод на розповсюдження інфрачервоного випромінювання

При проходженні через атмосферу інфрачервоне випромінювання ослабляється внаслідок поглинання і розсіювання молекулами газів, аерозолями, дощем, снігом, а також дрібними частками, що знаходяться в атмосфері в підвішеному стані. Крім ослаблення в щільних дисперсних середовищах, молекулярне поглинання є головною причиною ослаблення випромінювання. В діапазоні довжин хвиль понад 1 мкм в діапазоні висот до 12 км найбільше значення для роботи інфрачервоної апаратури має селективне поглинання випромінювання молекулами водяної пари, вуглекислого газу та озону.

Концентрація водяної пари в атмосфері залежить від багатьох факторів (географічне розташування, висоти, пори року, місцевих метеорологічних умов) і знаходиться в межах 0,001 ... 4% (за обсягом). Зі збільшенням висоти вміст водяної пари в атмосфері різко зменшується і при висотах понад 12 км дуже малий. Смути сильного поглинання випромінювання парами води відповідають

наступним 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 км змінюється від 0,03 до 0,05% (за обсягом). Смуги сильного поглинання випромінювання вуглекислим газом 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 озonom, окисом вуглецю, закисом азоту і метаном в нижніх шарах атмосфери можна не брати до уваги.

Завдання визначення пропускання інфрачервоного випромінювання атмосферою є складною і ґрунтується на аналітичних моделях молекулярного поглинання і розсіювання, а також моделях розсіювання на аерозолях. Точне вирішення цього завдання досить складне, але не завжди є потреба, так як часто невідомі метеорологічні та інші умови, в яких передбачається застосування тепловізійної апаратури. Тому для наближених розрахунків максимальної дальності дії і температурної чутливості теплопеленгаторів можна обмежитися експериментальними даними пропускання атмосферою інфрачервоного випромінювання в діапазонах чутливості приймачів випромінювання.

Поглинання випромінювання залежить від числа поглинаючих молекул на трасі. Тому для оцінки інтенсивності поглинання інфрачервоного випромінювання парами води вводять параметр *кількість осілої води*, що позначається ω . Величина ω визначається товщиною шару води, в міліметрах, який вийшов би при конденсації всієї водяної пари уздовж траси в посудині, наприклад, циліндричної форми. Чим більше величина ω , тим більше коефіцієнт поглинання атмосфери. У свою чергу величина ω залежить не тільки від довжини траси, але і від температури і відносної вологості повітря. Вона може змінюватися в широких межах (від 0,1 до 1000 мм).

Поглинання випромінювання вуглекислим газом також залежить від числа поглинаючих молекул на трасі. Воно прямо пропорційно довжині траси і тиску повітря та обернено пропорційно його температурі. По мірі збільшення висоти інтенсивність поглинання інфрачервоного випромінювання парами води і

вуглекислим газом зменшується. Це враховується поправочними коефіцієнтами, залежними від висоти.

На рис. 3.10 зображений графік залежності коефіцієнта пропускання атмосфери від довжини хвилі випромінювання. Цей графік отриманий експериментально і відповідає довжині горизонтальної траси 1,8 км на рівні моря при товщині шару осілої води 17 мм [10]. У верхній частині рисунка показано, молекулами яких газів поглинається інфрачервоне випромінювання. Ділянки, що характеризуються високим коефіцієнтом пропускання, називають *атмосферними вікнами*. Найбільше значення для сучасної інфрачервоної техніки мають спектральні смуги 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.

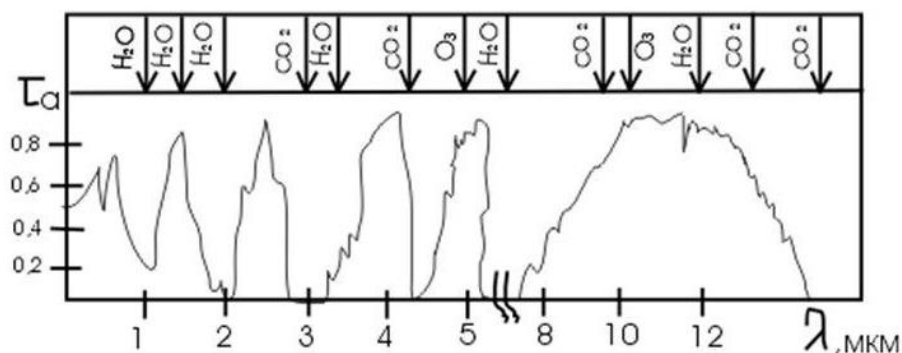


Рис. 3.10. Графік залежності коефіцієнта пропускання атмосфери τ_a від довжини хвилі

Випромінювання, як уже зазначалося, не тільки поглинається молекулами води, вуглекислого газу та озону, а й розсіюється молекулами повітря (молекулярне розсіювання) і різними частинками, присутніми в атмосфері: кристалами солей, порошинами, піднятими вітром з поверхні землі, залишками продуктів згоряння, краплями води і кристалами льоду (аерозольна розсіювання). У той час як коефіцієнти пропускання атмосферою монохроматичного випромінювання з урахуванням молекулярного розсіювання можна розрахувати з тим або іншим ступенем точності, розрахунок коефіцієнтів пропускання випромінювання з урахуванням аерозольного розсіювання практично неможливий, так як для цього необхідно знати кількість, розміри, форму і склад речовини аерозольних часток, на яких відбувається розсіювання випромінювання. Тут також велику користь відіграють експериментальні дані, які отримують при

певних значеннях *метеорологічної дальності видимості*. Цей параметр характеризує помутніння атмосфери і є найбільшою дальністю видимості вдень темних предметів з кутовими розмірами, більшими 30', що проєктуються на тлі неба на обрії. Метеорологічна дальність видимості змінюється в широких межах: від 20 ... 50 км (чисте повітря без опадів) до 0,2 ... 0,05 км (сильний туман або сильний сніг).

Туман і хмари сильно розсіюють випромінювання і практично непрозорі для інфрачервоних променів. При товщині хмарності понад 20 м, коли сонце не проглядається через хмари, інфрачервоне випромінювання також через них не проходить. Дощ, на відміну від туману і хмар, порівняно добре пропускає інфрачервоне випромінювання. Наприклад, коефіцієнт пропускання інфрачервоного випромінювання на трасі довжиною 1,8 км при слабкому дощі дорівнює 0,88, при середньому - 0,74, при сильному - 0,66 і при зливі - 0,38. У цих умовах можлива робота тепловізійної апаратури, але на зменшених відстанях.

Таким чином, аналіз датчиків систем технічного огляду повітряного простору довів перевагу інфрачервоних датчиків для виявлення малорозмірних повітряних об'єктів із тепловими двигунами.

Найбільший вплив на розповсюдження ІЧ випромінювання має селективне поглинання випромінювання молекулами водяної пари, вуглекислого газу та озону та залежить від діапазону довжин хвиль ІЧ випромінювання.

2.4. Висновки до розділу

Аналіз датчиків технічного зору, які можуть бути використані в TCAS призвів до наступних висновків:

- телевізійні датчики виділяють об'єкт на основі різниці яскравостей між ним та навколишнім середовищем тому вони мають низьку роздільну здатність на великих відстанях;
- радіолокаційні та лазерні датчики являються активними системами, які вимагають підвищеного енергоспоживання та додаткового місця розташування приймально-передавальних антен та об'єктивів;
- інфрачервоні датчики виявляють об'єкти, які мають тепловий контраст на фоні навколишнього середовища та можуть виявляти нагріті частини повітряних суден на фоні повітряного простору, температура якого зменшується з набором висоти.

Аналіз датчиків технічного зору, які можуть бути задіяні в TCAS показав, що телевізійні датчики мають малу здатність виявлення літаків на великих відстанях, а радіолокаційні та оптоелектронні датчики являються активними системами, що вимагають підвищеного енергопостачання та додаткового місця розташування приймально-передавальних антен та об'єктивів. Таким чином, аналіз датчиків систем технічного огляду повітряного простору довів перевагу інфрачервоних датчиків для виявлення повітряних об'єктів із тепловими двигунами.

Селективне поглинання випромінювання молекулами водяної пари, вуглекислого газу і озону має найбільший вплив на поширення ІЧ-випромінювання і залежить від діапазону довжин хвиль ІЧ-випромінювання.

РОЗДІЛ 3

ІНФРАЧЕРВОНІ ДАТЧИКИ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ПІД ЧАС ПОЛЬОТУ

Згідно з основними законами теплового випромінювання, низькотемпературне тіло володіє великою довжиною хвилі і низькою енергією теплового випромінювання. Тому важко виявити безпілотні літальні апарати з електродвигунами на великих відстанях за допомогою пасивних інфрачервоних датчиків. Однак у випадку металів із збільшенням довжини хвилі спектральне випромінювання зменшується, а коефіцієнт відбиття збільшується. У цьому випадку пропонується виявляти БПЛА за допомогою активної інфрачервоної системи, яка випромінює інфрачервоні промені з довжиною хвилі 8-14 мкм на повітряні об'єкти, тим самим збільшуючи температуру і інтенсивність випромінювання повітряного об'єкта.

Використання інфрачервоного випромінювача з заданою довжиною хвилі дозволяє об'єктам відображати це випромінювання, збільшуючи дозвіл виявлення. Так, якщо на борту повітряного судна використовується інфрачервоний випромінювач, інфрачервона система попередження про зіткнення отримає функції інфрачервоного локатора. В якості інфрачервоного випромінювача бажано використовувати інфрачервоний лазер з вузьким поперечним перерізом променя і великою дальністю дії. Тому вивчаються зміни інтенсивності інфрачервоного випромінювання БПЛА, опромінюваного лазером.

3.1. Лазерний нагрів матеріалів

Взаємодія лазерного випромінювання з сильно поглинаючими матеріалами в широкому діапазоні щільності світлового потоку добре описується тепловою моделлю, згідно якої весь процес в цілому можна розділити на кілька етапів: 1) поглинання світла та перенесення енергії на теплові коливання решітки твердого тіла; 2) нагрівання матеріалів без руйнування; 3) руйнування матеріалу та розширення отриманих продуктів (абляція); 4) охолодження після закінчення взаємодії.

Первинні процеси поглинання в матеріалах. Коли випромінювання взаємодіє із поверхнею середовища, воно частково відбивається, а частково проникає в матеріал де ним поглинається і, як правило, швидко перетворюється в тепло. У цьому випадку, 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 відраховується від поверхні до внутрішньої частини матеріалу. Формула, що відповідає лінійному поглинанню випромінювання, застосовна для металів, металізованих напівпровідників та діелектриків у широкому діапазоні довжин хвиль. У той же час конкретні значення величин A і α , що входять до нього, а також механізми поглинання світла та його переходу в тепло, можуть сильно відрізнятись для матеріалів різних класів.

У металах, світлові кванти поглинаються переважно електронами провідності, які розсіюють енергію від теплових коливань решітки під час декомпресії $10^{-11} \dots 10^{-12}$ с.

Цей процес протікає в шарі товщиною $10^{-6} \dots 10^{-5}$ см, приблизно відповідно глибині проникнення світла в метал. Оскільки декомпресія набагато коротша, ніж тривалість світлових імпульсів, що використовуються для обробки матеріалів (мова не йде про обробку ультракороткими лазерними імпульсами), можна припустити, що під час лазерного імпульсу джерело тепла, що нагріває металеву решітку, слідує за змінами 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 $\alpha \sim 10^5 \dots 10^6 \text{ см}^{-1}$. На відміну від металів, у напівпровідниках з незначною концентрацією вільних електронів при кімнатній температурі поглинання визначається переважно зв'язаними носіями. Напівпровідники сильно поглинають випромінювання, починаючи з певної частоти ν , для якої квантова енергія $h\nu$ ширша за діапазон E_g . Лінійний коефіцієнт α може досягати значень до $10^3 \dots 10^4 \text{ см}^{-1}$. Якщо $h\nu > E_g$, то дія лазерного випромінювання призводить до внутрішнього фотоефекту в напівпровіднику. З часом концентрація вільних носіїв збільшується. Однак у межі його зростання обмежений різними видами рекомбінації та дифузії електронів та дірок із області збудження через наявність градієнта концентрації носія. Інтенсивне вироблення тепла в решітці напівпровідника починається тоді, коли така концентрація електронів досягається, коли вони самі поглинають значну частку світлового потоку, тобто коли напівпровідник «металізується». Початковий коефіцієнт відбиття напівпровідників зазвичай менше, ніж у металів. Механізми поглинання світла в непрозорих неметалічних матеріалах можуть бути дуже різноманітними і включати, як частину вищезазначених механізмів міжзонного та внутрішньозонного поглинання. Важливу роль можуть відігравати поглинання домішок та поглинання дефектів та вкраплень, що призводить до внутрішньої абсорбції матеріалу під час нагрівання.

Вже перші експерименти про вплив лазерного випромінювання на матеріали, проведені в 60-х роках минулих століть, показали, що лазерний нагрів за своєю фізичною сутністю не відрізняється від інших видів нагріву. Як і для будь-якого іншого нагрівання, унікальною характеристикою теплової дії є температура, а сам нагрів полягає у збільшенні амплітуди теплових коливань решітки. Теплопередача в твердому тілі здійснюється механізмами теплопровідності, серед яких для металів і сильно вироджених напівпровідників головним є електронна теплопровідність, а для неметалів - решітка. Лазерний нагрів може супроводжуватися зміною оптичних та теплофізичних властивостей

матеріалу, його тепловим розширенням, а також фазовими переходами в твердому стані та плавленнєм. У деяких випадках під час нагрівання можуть активуватися процеси дифузії в твердому тілі та деякі хімічні реакції на його поверхні та в приповерхневих шарах. Таким чином, нагрівання матеріалів лазерним випромінюванням супроводжується звичайними, досить вивченими явищами. У той же час високі швидкості нагріву та охолодження та великі просторові градієнти температури визначають особливості лазерного нагріву. Вони можуть і призводять до значних відмінностей в ході теплових процесів, стимульованих лазерним впливом. Важливу роль у нагріванні лазерним випромінюванням відіграє зміна оптичних властивостей речовини, оскільки кількість виділеного тепла та його просторовий розподіл безпосередньо залежать від значень поглинальної здатності та коефіцієнта поглинання. Формування зворотних зв'язків на оптичних параметрах поверхні матеріалу, які змінюються при лазерному опроміненні, вносить фундаментальні особливості в хід процесів. Унікальна специфіка лазерного нагріву проявляється в області коротких і надкоротких тривалостей лазерного імпульсу і полягає в тому, що необхідно розглянути температури окремо для електронної підсистеми та решітки. Етап нагрівання матеріалів лазерним випромінюванням є основним при вивченні фізичної природи технологічних операцій, що проводяться без руйнування матеріалу, наприклад, зварювання, термічної обробки, дифузії тощо. Для лазерної обробки матеріалів, пов'язаних з руйнуванням та видаленням деяких їх частин етап нагрівання є попереднім, але в той же час дуже важливим, оскільки його аналіз дозволяє визначити умови настання руйнування.

3.2. Вплив теплового ефекту на фізичні властивості матеріалів.

Під час впливу лазеру на матеріали спостерігаються різноманітні процеси та явища, які призводять до зміни оптичних та електричних характеристик матеріалу, його структури та фазового складу. Варто відзначити основні фізико-хімічні явища, що представляють найбільший практичний інтерес у вирішенні інженерних задач у технології лазерного нагріву матеріалів.

Плавлення. Коли кристалічне або полікристалічне тверде тіло опромінюється лазерним випромінюванням достатньої щільності потужності, його температура T може зростати до температури плавлення $T_{пл}$. Температури плавлення різних матеріалів значно варіюються від приблизно 500 К для низькоплавких металів (свинцю, олова) до 3300 К для високоплавких металів (вольфрам, платина). Відповідно, змінюється як і кількість теплоти, необхідна для нагрівання металу від кімнатної температури до температури плавлення, так і прихована теплота твердого фазового переходу - розплав $L_{пл}$. Роль прихованого тепла плавлення, тобто тепла, необхідного для руйнування кристалічної решітки тіла, тим більше, чим нижча температура плавлення. Якщо продукти лазерного руйнування негайно видаляються з поверхні твердого тіла, наприклад, в результаті продування струменем повітря, то процес називається лазерною абляцією. Метою теоретичного аналізу процесу плавлення є визначення товщини розплавленого шару та тривалості плавлення до моменту інтенсивного випаровування матеріалу. Знання цих параметрів процесу плавлення є дуже важливим, зокрема, при використанні лазерного випромінювання для імпульсного та безперервного зварювання.

Випаровування. Рідку фазу, що утворюється під час плавлення твердої речовини, можна нагріти до температури випаровування $T_{вип}$. Фазовий перехід рідкої пари - виникає, коли в зону впливу $L_{вип}$ потрапляє кількість тепла, рівна або більша, ніж теплота випаровування. Для ряду матеріалів, у яких процес теплового руйнування протікає без утворення рідкої фази, відбувається твердотільний фазовий перехід - пара, що називається сублімацією. Випаровування матеріалів може відбуватися у вигляді кипіння, що

характеризується появою і зростанням насичених бульбашок пари в розплаві біля нагрівальної поверхні. Випаровування - типовий механізм лазерної абляції. У деяких матеріалах (деревині, мінералах) інтенсивне лазерне нагрівання призводить до випаровування пов'язаної (кристалізації) води чи інших рідких компонентів. Такі продукти, що легко випаровуються, створюють високий тиск у зоні нагрівання, що призводить до утворення мікротріщин, викиду частинок матеріалу та перебудови його хімічної структури.

При аналізі лазерного випаровування матеріалів дуже важливим є питання "енергетичної організації" процесу. При низькій щільності потужності поглиненого лазерного випромінювання ($q \leq 10^4$ Вт/см²) руйнування майже всіх металів пов'язане з плавленням та абляцією. Частка газової фази в продуктах руйнування невелика. Збільшення потужності лазерного випромінювання призводить до підвищення температури матеріалу ($T \geq T_{пл}$), відповідно збільшується і роль випаровування в процесі руйнування. Фізична модель, що описує процес випаровування, є досить складною. Зокрема, важко визначити частку розсіяного та поглиненого лазерного випромінювання у паровій хмарі біля поверхні, врахувати вибухонебезпечні ефекти та взаємодію різних фаз у зоні обробки.

Кристалізація. Тепловий ефект поглиненого лазерного випромінювання може призвести до зміни структури та оптичних та електрофізичних властивостей матеріалу в зоні обробки. Характер цих змін залежить від властивостей опромінюваного матеріалу, потужності поглиненого випромінювання, швидкості нагрівання та охолодження.

При лазерному опроміненні кристалізація розплаву може забезпечувати або утворення матеріалів з різним типом кристалічної решітки, або структурування аморфних тіл. У цьому випадку питома теплота кристалізації вивільняється в зоні теплового удару (у випадку фазового переходу рідина - тверда речовина).

Термохімічні реакції. Лазерне нагрівання речовин може стимулювати виникнення незворотних хімічних реакцій, що викликають прискорення руйнування матеріалу. Великий тепловий внесок екзотермічних реакцій,

ініційованих у зоні нагрівання, призводить до займання матеріалу, яке може перейти в автономний режим. У цьому випадку матеріал запалюється в районі, розміри якого в багато разів перевищують зону опромінення.

Крім того, вплив лазерного випромінювання на метали сприяє розвитку термохімічних реакцій, за допомогою яких можна окиснювати поверхню, відновлювати метали, розкладаючи складні сполуки, синтезувати нові матеріали. При цьому оптичні властивості матеріалів (насамперед поглинальна здатність) суттєво змінюються через зміни фізико-хімічних властивостей поверхні.

Взаємозв'язок фізичних процесів, що супроводжують процес дії лазерного випромінювання на матеріали, показаний на рис. 3.1.

Під час лазерного опромінення відповідно до кількості поглинутого потоку матеріал нагрівається, плавиться та випаровується. В кінці експозиції він охолоджується. Після будь-якої з перерахованих вище стадій (нагрівання, плавлення, випаровування) можливий процес кристалізації - зміни структури. Стрілки вказують на виникнення зворотних реакцій на оптичні властивості, зокрема, на поглинання при нагріванні матеріалу, під час плавлення. Останнє особливо стосується напівпровідникового опромінення. Більше того, в нагрітому матеріалі на поверхні можуть активуватися термохімічні реакції, можлива деформація поверхні, а коли матеріал випаровується, можливі хімічні реакції у парофазному стані.

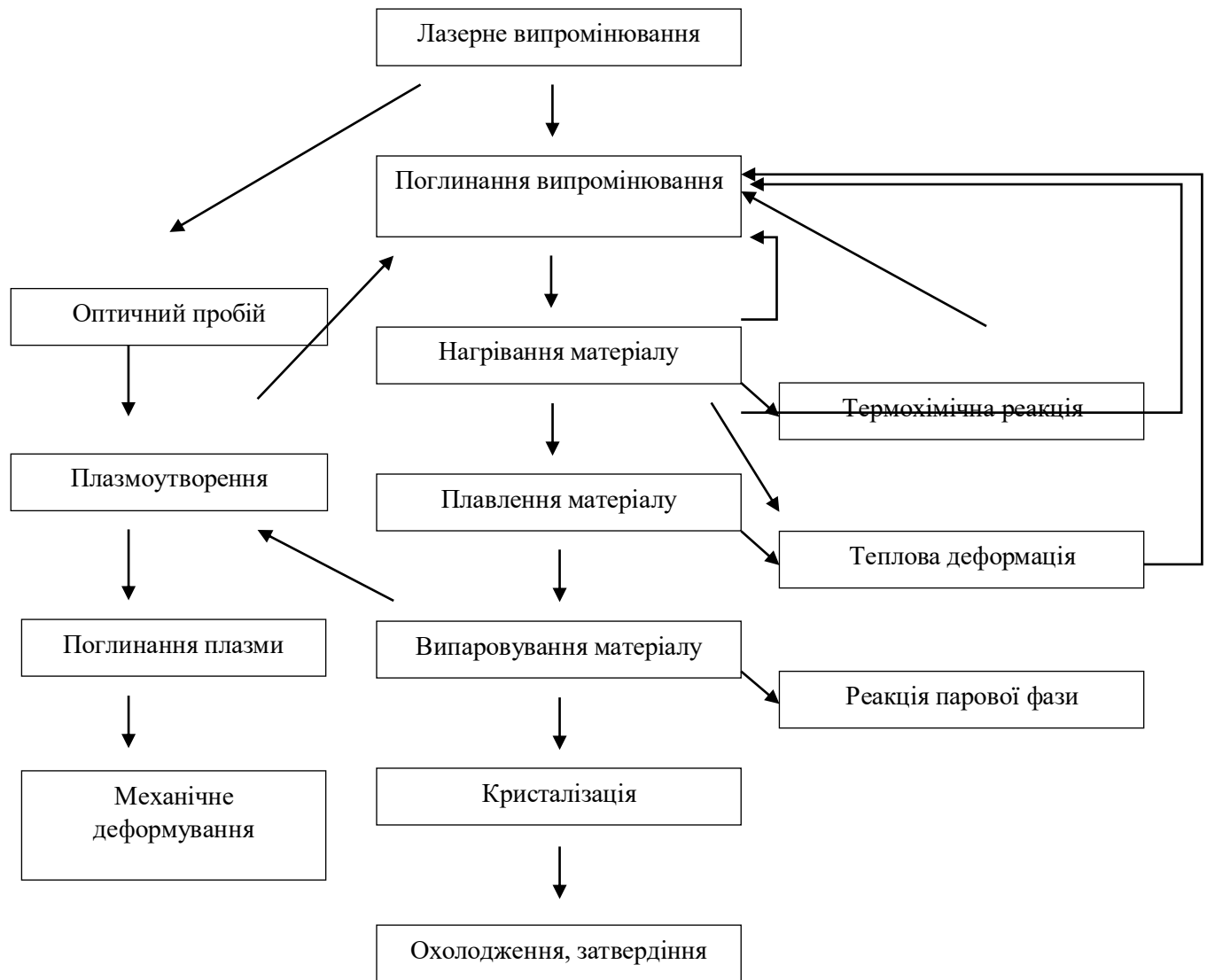


Рис. 4.1. Зв'язок фізичних процесів при впливі лазерного випромінювання на матеріали.

Поява оптичного пробою під час проходження випромінювання через прозоре середовище відзначається з лівого боку ланцюга. Зокрема, при опроміненні на повітрі може статися оптичний зрив (іскріння) у повітрі. Над поверхнею матеріалу утворюється плазма, що складається як з частинок оптичного руйнування навколишнього середовища, так і з випарених частинок матеріалу. Приземна плазма бере участь у поглинанні випромінювання і може значною мірою захищати ціль. Очевидно, що набір фізичних процесів у зоні удару визначається температурою, швидкістю нагрівання та часом, швидкістю охолодження матеріалу, які, у свою чергу, залежать від геометричних та енергетичних

характеристик лазерного випромінювання, властивостей матеріалу, що обробляється, маси опроміненого продукту, технологічної схеми переробки тощо.

Тому в майбутньому основними завданнями в аналізі лазерного нагріву будуть:

- оцінка швидкості нагріву та характерної шкали нагріву (теплова фізика процесу);
- ідентифікація та аналіз фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час опромінення, та опис їх впливу на нагрівання.

3.3. Теплове випромінювання безпілотних літальних апаратів.

Процес теплопередачі можна поділити на дві категорії. Перша визначається тим фактом, що структурні елементи навколишнього середовища, які знаходяться на шляху переносу теплоти беруть участь в процесі переносу. Це теплопровідність та конвекція. Друга категорія характеризується тим що середовище може не брати участі в передачі теплоти і це теплове випромінювання. Таким чином, між процесами теплопровідності та конвекції, з одного боку, та тепловим випромінюванням – з іншого, існує принципова різниця.

Конвективний переніс теплоти та теплопровідність розглядались при безперервному температурному полі і у тих випадках, коли теплота переходить від твердого тіла до рідин і навпаки. Температурний градієнт завжди мав кінцеве значення, крім тих випадків коли дорівнював нулю.

Теплове випромінювання - це складний процес, обумовлений тим, що перетворення енергії відбувається щонайменше двічі: перший раз, перехід теплової енергії у випромінювання (перше перетворення енергії) електромагнітних хвиль (випромінювання), потім поширення хвиль (фотонів), і нарешті, поглинання електромагнітних коливань поглинаючим середовищем або тілом (поглинання) є другим перетворенням енергії. Теплове випромінювання розглядається як процес поширення поперечних електромагнітних хвиль, що виходять із випромінювача. Ці електромагнітні хвилі поширюються по прямій

лінії і коли вони поглинаються будь-яким тілом чи середовищем потім перетворюються знову у тепло.

Носіями променистої енергії є електромагнітні коливання. Останні можна характеризувати або частотою ν (1/с), або довжиною хвилі λ (м). Ці дві характеристики пов'язані між собою відомим співвідношенням:

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

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

Вплив випромінювання при потраплянні на речовину залежить від довжини хвилі. Орієнтована класифікація різних видів випромінювання може бути такою

Тип випромінювання	(довжина хвилі, м):
космічне випромінювання.....	до 10^{-13}
γ - випромінювання.....	$10^{-13} \dots 10^{-10}$
x- промені.....	$5 \cdot 10^{-12} \dots 2 \cdot 10^{-8}$
ультрафіолетові промені.....	$2 \cdot 10^{-8} \dots 4 \cdot 10^{-7}$
видимі (світлові) промені.....	$4 \cdot 10^{-7} \dots 8 \cdot 10^{-7}$
теплові промені.....	$10^{-7} \dots 10^{-4}$
радіохвилі.....	$> 2 \cdot 10^{-4}$

Промені, що виникають за рахунок зміни температури та фізичних властивостей тіл, називають тепловими, а процес їхнього розповсюдження тепловим (інфрачервоним) випромінюванням ($\lambda = 0.4 \dots 200$ мкм) або тепловою радіацією.

Теплове випромінювання є властивістю всіх тіл. Всі нагріті тіла випромінюють в оточуючий простір інфрачервоне випромінювання. При попаданні на інші тіла ця енергія частково відбивається, частково поглинається,

частково проходить крізь тіло. Та частина енергії, що поглинається тілом, знову перетворюється на теплову. Та частина, що відбивається (або проходить) потрапляє на інші тіла та поглинається або знов відбивається ними. Таким чином, після ряду поглинань та відбиття енергія, що випромінюється, повністю розподіляється між оточуючими тілами. Отже, кожне тіло не тільки безупинно випромінює, але й поглинає енергію.

Промениста енергія, що проходить крізь довільну поверхню в одиницю часу, називається потоком випромінювання Q , (Вт).

Потік випромінювання, що виходить з одиниці площі поверхні за всіма напрямками напівсферичного простору, називається густиною потоку випромінювання E , (Вт/м²) і записується так:

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

де dQ - потік випромінювання крізь елементарну площину dF .

Звісно, що променистий потік, який йде від всієї поверхні тіла (F), дорівнює

$$Q = \int_F E dF,$$

Потік випромінювання – це характеристика випромінювання, яка не відрізняє промені різних довжин хвиль. Такі величини носять назву інтегральних, а випромінювання з різними довжинами хвиль називається інтегральним. Випромінювання із фіксованою довжиною хвилі називається монохроматичним. Розподіл променистої енергії за довжинами хвиль випромінювання характеризується спектральною інтенсивністю випромінювання E_λ , (Вт/м³), яка задається як похідна:

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

де dE – густина потоку випромінювання із довжинами хвиль від λ до $\lambda+d\lambda$.

З останньої формули витікає зв'язок між інтегральним потоком та спектральною інтенсивністю:

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda ,$$

Розглянемо поняття, що описують взаємодію випромінювання з речовиною (рис. 3. 2).

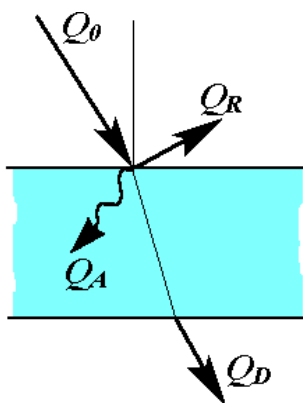


Рис. 3.2. Схема розподілу променистої енергії

Нехай з усього променистого потоку Q_0 , що падає на тіло, частина Q_A - поглинається, частина Q_R - відбивається, а частина Q_D - проходить крізь тіло . У такому разі, якщо у тілі нема джерел енергії, рівняння енергетичного балансу приймає форму:

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

Поділивши обидві частини останньої рівності на Q_0 , отримаємо співвідношення:

$$R + A + D = 1 , \tag{3.1}$$

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.

Абсолютно білих, чорних або прозорих тіл в природі не існує. Коефіцієнти R , A , D залежать від природи тіла, його температури та спектра випромінювання, яке падає на тіло. Наприклад, для теплових променів чисте повітря - прозоре, а за наявності домішок водяної пари або вуглекислоти, повітря стає напівпрозорим.

Тверді тіла та деякі рідини для теплових променів практично непрозорі, тобто в цьому випадку $D = 0$ і, згідно з формулою (3.1), виконується співвідношення:

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

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

Надалі ми в основному будемо розглядати непрозорі тіла, що дозволятиме використовувати зв'язок (3.2) (наприклад, у формі $R = 1 - A$).

Велике значення має стан поверхні. Відбивна здатність гладких, добре відполірованих поверхонь значно вище, ніж шорстких, незалежно від кольору.

Крім того, що тіло взаємодіє із зовнішнім випромінюванням, воно само випромінює енергію. Це приводить до необхідності введення низки понять. Так, навіть якщо на тіло зовні не падає жодних променів, все одно з його поверхні відводиться променистий потік енергії (позначимо його густину E_1 , (Вт/м²)).

Цей потік повністю визначається температурою та фізичними властивостями тіла. Відповідне випромінювання - власне випромінювання тіла, а величина E_1 - випромінювальна здатність поверхні. Одночасно з боку інших тіл на тіло попадає промениста енергія в кількості E_2 - це випромінювання, що падає зовні (Рис. 3.3).

Частина падаючого випромінювання в кількості $E_{noz} = A_1 E_2$ поглинається тілом - це випромінювання, що поглинулося; інша частина - в кількості $E_{vid} = R_1$

$E_2 = (1 - A_1) E_2$ - відбивається – це відбите випромінювання (тут A_1 та $R_1 = 1 - A_1$ - відповідно, коефіцієнти поглинання та відбиття тіла).

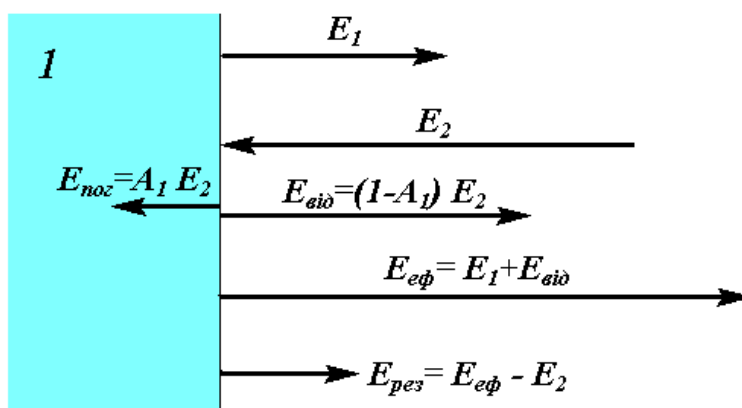


Рис. 3.3. Схема різновидів випромінювання

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

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

Це фактичне випромінювання тіла, що ми відчуваємо або вимірюємо приладами. Його питомий потік більше питомого потоку власного випромінювання на величину $(1 - A_1)E_2$. Ефективне випромінювання залежить від фізичних властивостей та температури не тільки тіла, що випромінює, але й інших оточуючих його тіл, а також від форми, розмірів та відносного розташування тіл в просторі.

Результуюче випромінювання (що характеризується питомим потоком $E_{рез}$) являє собою різницю між ефективним випромінюванням, яке йде від тіла ($E_{еф}$) та до нього (E_2). Можна показати, що результуюче випромінювання також дорівнює різниці між власним випромінюванням (E_1) та тією частиною зовнішнього випромінювання, що поглинається даним тілом ($E_{noz} = A_1 E_2$). Таким чином

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

Величина $E_{рез}$ визначає результуючий питомий потік енергії, який дане тіло передає оточуючим його тілам в процесі променистого теплообміну. Якщо

величина $E_{рез} < 0$, то це значить, що тіло в променистому теплообміні одержує енергію, за зворотної умови ($E_{рез} > 0$) – тіло енергію віддає.

Таким чином, якщо $A = 1$, то $R = D = 0$, тобто вся падаюча променева енергія повністю поглинається тілом, таке тіло називається абсолютно чорним.

Якщо $R = 1$, то $A = D = 0$, тобто вся падаюча енергія повністю відбивається, такі поверхні називаються дзеркальними або (якщо відбиття дифузне), абсолютно білими.

Якщо $D = 1$, то $A = R = 0$, тобто вся падаюча променева енергія 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°C , розрахуємо можливість виявлення БПЛА типу «Квадрокоптер» інфрачервоною системою огляду повітряного простору.

При використанні інших видів БПЛА виявляюча здібність тепlopеленгатора буде збільшуватись за рахунок збільшення розмірів повітряного об'єкта та за рахунок використання інших типів силової установки (наприклад двигунів внутрішнього згорання) які мають вищу робочу температуру (див розділ 2).

Отже вхідні дані для розрахунку:

- фронтальна площа квадрокоптера – $0,04 \text{ м}^2$;
- максимальна температура електродвигуна - 80°C ;
- 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 за його випромінюванням інфрачервоного діапазону повинна виконуватись умова:

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

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

Звідси сигнал завжди повинен мати рівень вище шуму, тобто $q \geq 1$, тому потік теплового випромінювання повинен перевищувати порогову чутливість приймача випромінювання $\Phi_{QC} > \Phi_L$

Визначимо енергетичні світність $M_{e(\lambda)}$ квадрокоптера виробленого із алюмінію. Відповідно до рис. 3.4 [3] коефіцієнт теплового випромінювання полірованого алюмінію в діапазоні температур від 50 до 500°C складає 0,05.

1.2. Коэффициенты теплового излучения ϵ_T различных материалов (для направления, совпадающего с нормалью к поверхности)

Материал	Температура, °C	ϵ_T
<i>Металлы</i>		
Алюминий: полированный с шероховатой поверхностью листовой	50...500	0,04...0,06
	20...50	0,06...0,07
	100	0,09

Рис. 3.4. Коефіцієнт теплового випромінювання алюмінію

За законом зміщення Віна для температури силової установки коптера $T=80^\circ\text{C}$, 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 $\lambda = 8 \dots 14 \text{ мкм}$.

Розрахуємо для цього діапазону відносні коефіцієнти довжин хвиль

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

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

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

Відповідно до закону Стефана-Больцмана знайдемо енергетичні світність абсолютно чорного тіла три температури $T=80^\circ\text{C}$:

$$M_e = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \times (273 + 80)^4 = 880.4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

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

$$M_{e(8...14)} = \varepsilon_T \sigma T^4 [z(x_{14}) - z(x_8)] = \varepsilon_T M_e [z(0.978) - z(1.711)] = 0.05 \times 880.4 \times 0.392 = 17.25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Звідси можна визначити потік випромінювання квадрокоптера на мінімальній відстані:

$$\Phi_{1QC} = M_{e(8...14)} \times S_u = 17,25 \times 0,04 = 0,69 \text{ Вт}.$$

При проходженні через атмосферу та оптичну систему тепlopеленгатора, 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:

$$\Phi_{впр} = \frac{\tau_{np} S_{об} \varepsilon_u S_u \cos \alpha \sigma T_u^4}{\pi L^2} K \left[z\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_m}\right) - z\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_m}\right) \right].$$

де τ_{np} - коефіцієнт пропускання оптичної системи; $S_{об}$ - площа об'єктива приймача випромінювання; ε_u - коефіцієнт теплового випромінювання об'єкта; S_u - 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_u - температура об'єкта; $K \left[z \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_m} \right) - z \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_m} \right) \right]$ - коефіцієнт використання випромінювання; L - відстань від об'єкта до приймача випромінювання.

Розрахунки представлені на рис. 3.5. показали, що потік власного випромінювання квадрокоптера на відстані 5000 м близький або нижче рівня порогової чутливості тепlopеленгатора.

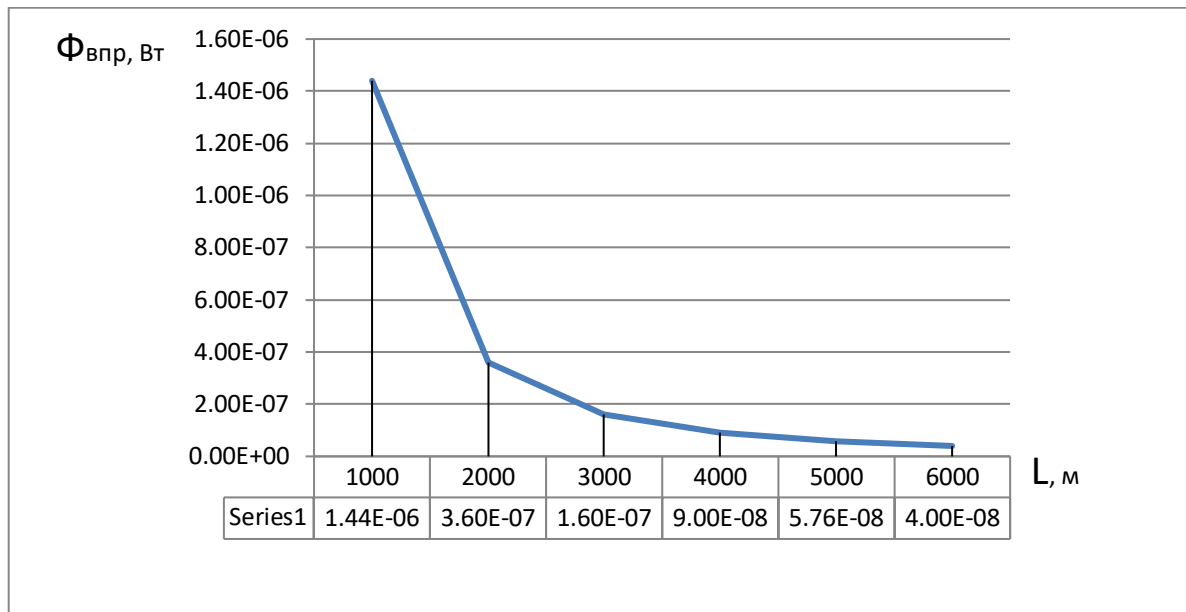


Рис. 4.5. Залежність потоку власного випромінювання квадрокоптера від відстані до тепlopеленгатора

Отже необхідно збільшити потік випромінювання квадрокоптера для збільшення імовірності його виявлення інфрачервоними засобами огляду повітряного простору.

Вирішити це завдання можна двома шляхами: збільшуючи температуру квадрокоптера або використовуючи його як відбивальну поверхню, для електромагнітних хвиль інфрачервоного діапазону із довжиною $\lambda = 8 - 10$ мкм.

Підвищити температуру квадрокоптера можливо за рахунок його опромінення потужними лазерними імпульсами, але більшість частин силової конструкції квадрокоптера виготовлені із полірованого алюмінію, який має низьку

здатність поглинати інфрачервоне випромінювання та зовсім не пропускає його:
 $D=0, A \rightarrow 0$.

У цьому випадку відповідно до виразу $R + A = I$ максимальне значення має коефіцієнт відбиття $R \rightarrow I$. Тому доцільно збільшити потік випромінювання квадрокоптера за рахунок відбиття інфрачервоного випромінювання довжиною близькою до власного випромінення.

У цьому випадку сумарний або результуючий потік випромінювання квадрокоптера складається із власного потоку випромінювання $\Phi_{впр}$ та потоку випромінення відбитого від нього $\Phi_{лпр}$:

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

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

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

де Φ_n - світловий потік підсвітлювача; $\tau_{нр}$ - 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 об'єкта; D_n^2 - діаметр оптики підсвітлювача; S_n - площа випромінювача.

В залежності від наявності гідрометеорів і пилу в повітрі, частина потоку випромінювання буде відбиватися від них, і тим самим засліплює приймач теплового випромінювання. Це не дає можливості в повній мірі отримати ефект суми власного і відбитого потоку випромінювання.

Результати розрахунків потоку відбитого від БПЛА випромінювання в залежності від відстані до тепlopеленгатора представлені на рис. 4.6.

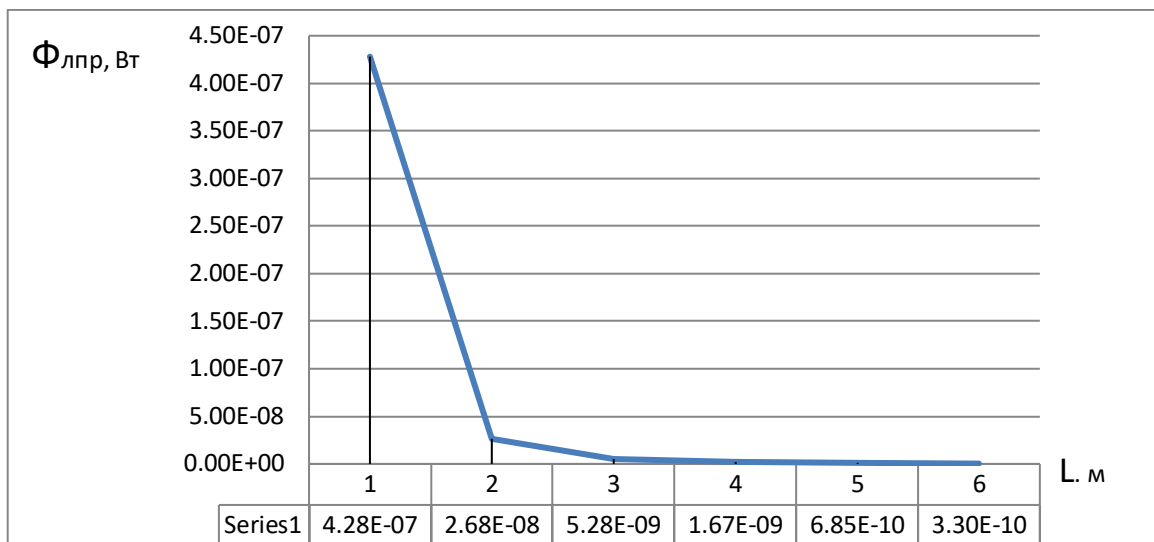


Рис. 4.6. Залежність потоку відбитого від БПЛА випромінювання від відстані до теплопеленгатора

Таким чином підсвічування низькотемпературних об'єктів лазерним променем інфрачервоного діапазону, який відповідає довжині хвилі власного випромінювання квадрокоптера показав, що в залежності від характеристик лазера та прозорості атмосфери найбільш доцільно використовувати запропонований спосіб на відстанях до 3 км від теплопеленгатора, що дасть можливість здійснити маневр ухилення від зіткнень.

Результуючий потік власного випромінювання квадрокоптера та відбитого від нього випромінювання лазерного підсвітлювача представлено на рис. 4.7.

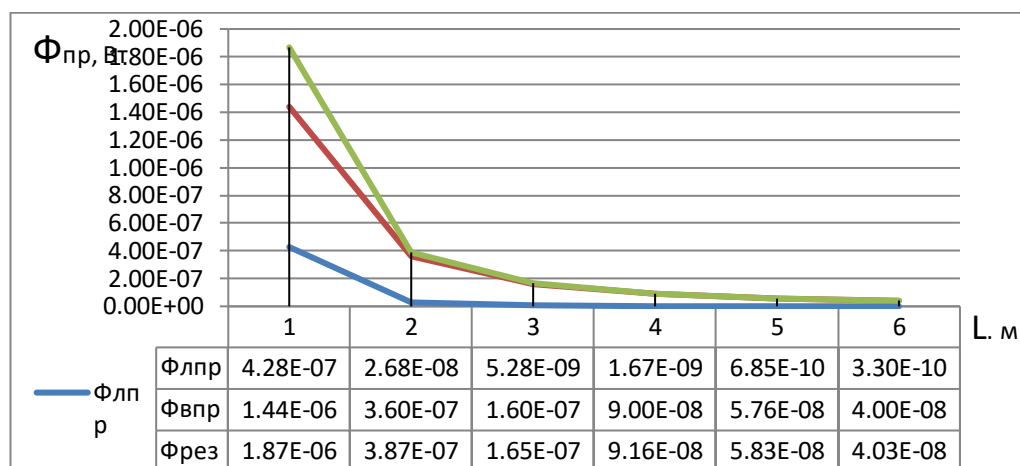


Рис. 4.7. Залежність результуючого потоку випромінювання БПЛА від відстані до теплопеленгатора

Аналіз залежності результуючого потоку випромінювання від відстані до теплопеленгатора показав, що навіть на відстанях більше 6000 метрів рівень

результуючого випромінювання перевищує порогову чутливість приймача інфрачервоного випромінювання, що дасть можливість виявляти БПЛА на дальностях достатніх для маневру та ухилення від зіткнень (рис. 4.8.).

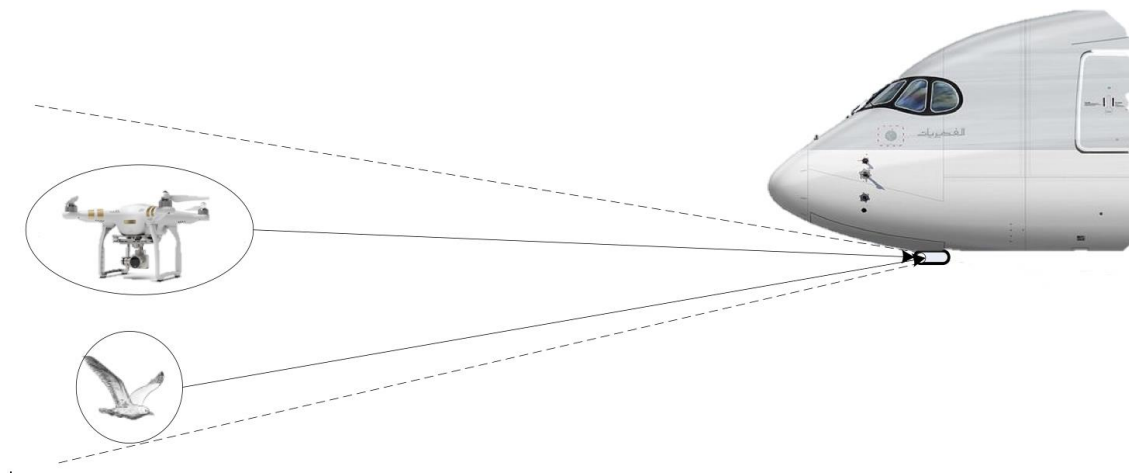


Рис. 4.8. Схема функціонування системи попередження зіткнень із орнітологічними та малорозмірними об'єктами.

Таким чином, використання інфрачервоного лазерного прожектора дозволить висвітлити всі об'єкти в напрямку руху літального апарату вузьким променем, що збільшить їх енергію випромінювання і дозволить виявити інфрачервоними засоби запобігання зіткненням. Крім того, лазерне випромінювання відлякує птахів, які знаходяться в зоні дії, а активна інфрачервона система попередження зіткнень дозволить виявити планери та мотодельтаплани, які також мають низькі швидкості польоту і не оснащені відповідачами систем керування повітряним рухом.

3.4. Висновки до розділу

Проблеми зіткнень повітряних суден вирішуються за рахунок складної взаємодії систем управління повітряним рухом і бортових систем запобігання зіткнень. Існуюча система TCAS обмінюється інформацією з відповідачами про контроль повітряного руху інших повітряних суден. Якщо відповідач КПП не подає сигналів, можливе зіткнення в повітрі. Тому рекомендується використовувати інфрачервоні датчики для систем технічного зору в якості додаткових датчиків для системи TCAS.

Найбільш доцільно використовувати інфрачервоні датчики в TCAS (англ. infrared sensor). Основними перевагами інфрачервоних датчиків є можливість пасивного виявлення інших літаків на відстані 10-20 км по тепловому зображенню працюючих двигунів і нагрівають елементів фюзеляжу. Це дозволяє визначати кут азимута і кут місця іншого повітряного судна в пасивному режимі, а також визначати наближення або видалення "вторгається повітряного судна" шляхом зміни потужності теплового випромінювання. Датчики цього типу використовуються в авіації в якості теплового компаса для пасивного виявлення інших повітряних суден. Таким чином, використання інфрачервоних датчиків в якості резервного для TCAS дозволяє виявляти «літак-порушник» в зоні попередження з неробочим КПП-відповідачем, визначати його місце розташування і напрямок руху для формування команд екіпажу для усунення зіткнення літаків в повітрі.

Ось тому, використання інфрачервоного лазерного прожектора дозволяє висвітлювати всі об'єкти в напрямку руху літака вузьким променем, що збільшує енергію їх випромінювання і дає можливість ідентифікувати інфрачервоні засоби запобігання зіткнень. Крім того, лазерне випромінювання відлякує птахів в зоні дії, а активна інфрачервона система попередження про зіткнення дозволяє ідентифікувати планери і мотодельтаплани з низькими швидкостями польоту, а також системи управління повітряним рухом, які не оснащені відповідачами.

ВИСНОВКИ

Під час написання дипломної роботи було розглянуто найбільш поширені випадки небезпечних зближень і зіткнень повітряних суден з повітряними об'єктами.

До них відносяться: небезпечні зближення з іншими повітряними суднами, а також небезпечні зближення або зіткнення з повітряними об'єктами, на яких немає засобів реагування управління повітряним рухом, якими найчастіше є птахи і безпілотні літальні апарати.

Також ми розглянули датчики технічного зору, які можуть бути задіяні в TCAS і визначили, що телевізійні датчики мають малу здатність виявлення літаків на великих відстанях, а радіолокаційні та оптоелектронні датчики являються активними системами, що вимагають підвищеного енергопостачання та додаткового місця розташування приймально-передавальних антен та об'єктів. Таким чином, аналіз датчиків систем технічного огляду повітряного простору довів перевагу інфрачервоних датчиків для виявлення повітряних об'єктів із тепловими двигунами.

І провели дослідження інфрачервоного лазерного прожектора, що дозволяє висвітлювати всі об'єкти в напрямку руху літака вузьким променем, і збільшує енергію їх випромінювання і дає можливість ідентифікувати інфрачервоні засоби запобігання зіткнень. Крім того, лазерне випромінювання відлякує птахів в зоні дії, а активна інфрачервона система попередження про зіткнення дозволяє ідентифікувати планери і мотодельтаплани з низькими швидкостями польоту, а також системи управління повітряним рухом, які не оснащені відповідачами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Малогабаритные беспилотные авиационные комплексы (MiniUVS) / Башинский В.Г., Бзот В.Б., Жилин Е.И. и др. / Монография. – Запорожье: изд. АО «Мотор-Сич», 2014. – 261 с..
2. Техническое зрение в системах управления мобильными объектами.: Труды НТКС. Вып. 4 – М. :КДУ, 2011.– 328 с.
3. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах: Учеб.пособие / СПбГУАП. СПб., 2002. 120 с.
4. Хадсон Р., Инфракрасные системы, (Infrared system engineering, 1969) Перевод с английского Я.Б. Герчикова, Ю.Е. Голубчина, С.Г. Кина. Под редакцией Н.В. Васильченко.М.: Мир, 1972, 535 стр.
5. Ллойд Дж., Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 стр.
6. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники.М.: Сов.радио 1978. 400 с.
7. A.Sanna, F. Lamberti. Advances in Target Detection and Tracking in Forward-Looking InfraRed (FLIR) Imagery. Sensors (Basel). 2014 Nov; 14(11): 20297–20303..
8. Н.В. Srivastaval, Y.B. Limbu, R. Saran, A. Kumar. Airborne Infrared Search and Track Systems. Defence Science Journal, Vol. 57, No. 5, September 2007, pp. 739-753
9. Аппен А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия Издание второе, переработанное и дополненное Издательство "Химия", Ленинградское отделение, 1976 г., 296 с
10. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов. Учебное пособие. Под общей редакцией В.П. Вейко – СПб: НИУ ИТМО, 2014. –181с.
11. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. Учебное пособие. Киев, Издательство Выща школа, Головное изд-во, 1988. 385 с.