

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

ДОПУСТИТИ ДО
ЗАХИСТУ

Завідувач випускової
кафедри

_____ Ю.В. Грищенко

«___» _____ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»**

Тема: «Система виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів»

Виконавець: _____ Київський Ярослав Геннадійович

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

Керівник: _____ к.т.н., доц. Чужа Олексій Олексійович

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

Консультант розділу «Охорона праці»: _____

(підпис)

О.О. Козлітін

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Консультант розділу «Охорона

навколишнього середовища»: _____

(підпис)

Л.М. Черняк

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Нормоконтролер: _____

(підпис)

В.В. Левківський

(П.І.Б.)

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та
телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Ю.В.Грищенко

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Київський Ярослав Геннадійович

1. Тема роботи: «Система виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів»,

затверджена наказом ректора від «03» жовтня 2023р. № 2024/ст.

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

3. Вихідні дані роботи: характеристика малорозмірних безпілотних літальних апаратів, аналіз засобів технічного огляду повітряного простору, аналіз ознак виявлення малорозмірних повітряних об'єктів, обґрунтування вибору типу системи виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів.

4.Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):
аналіз та характерні ознаки малорозмірних повітряних об'єктів; технічні засоби виявлення повітряних об'єктів; інфрачервона система виявлення безпілотних літальних апаратів.

5.Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу :

Класифікація БПЛА; Спектр електромагнітних хвиль; Теплопеленгатор (IRST) та сформоване ним зображення; Залежність інтенсивності ІЧ випромінювання від довжини хвилі та температури; Випромінювання турбореактивного двигуна БПЛА; Схема розподілу променистої енергії; Залежність сумарного потоку випромінювання БПЛА від відстані до теплопеленгатора.

6. Календарний план-графік

| № пп | Етапи виконання роботи | Термін виконання етапів | Відмітка про виконання |
|------|---|-------------------------|------------------------|
| 1 | Підбір літератури | 05-16.10.2023 | |
| 2 | Підготовка та написання розділу 1 «Аналіз та характерні ознаки малорозмірних повітряних об'єктів» | 17-31.10.2023 | |
| 3 | Підготовка та написання розділу 2 «Технічні засоби виявлення повітряних об'єктів» | 01-15.11.2023 | |
| 4 | Підготовка та написання розділу 3 «Інфрачервона система виявлення безпілотних літальних апаратів» | 16-30.11.2023 | |
| 5 | Підготовка та написання розділу 4 «Охорона навколишнього середовища» | 01-07.12.2023 | |
| | Підготовка та написання розділу 5 «Охорона праці» | 07-14.12.2023 | |
| 6 | Перевірка на плагіат, оформлення та отримання рецензії | 15-19.12.2023 | |
| 7 | Підготовка презентації та доповіді | 20-25.12.2023 | |

7. Консультанти з окремих розділів

| Назва розділу | Консультант (посада, П.І.Б.) | Дата, підпис | |
|----------------------------------|------------------------------|----------------|------------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Охорона навколишнього середовища | Доцент Черняк Л.М | | |
| Охорона праці | Ст. викладач Козлітін О.О. | | |

8. Дата видачі завдання «05» жовтня 2023 р.

Керівник дипломної роботи _____

О.О. Чужа

Завдання прийняла до виконання _____

Я.Г. Київський

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, скорочень, термінів.....
Вступ.....

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ХАРАКТЕРНІ ОЗНАКИ МАЛОРОЗМІРНИХ ПОВІТРЯНИХ ОБ’ЄКТІВ

- 1.1. Використання безпілотних літальних апаратів
- 1.2. Стан розвитку безпілотних літальних апаратів в Україні
- 1.3. Типи БПЛА
- 1.4. Переваги та недоліки застосування БПЛА
- 1.5. Канали виявлення БПЛА
- 1.6. Методи виявлення БПЛА
- 1.7. Аналіз існуючих заходів протидії БПЛА

РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ’ЄКТІВ

- 2.1. Система попередження запобігання зіткнень TCAS
- 2.2. Система виявлення та уникнення DAA
- 2.3. Наземні радіолокатори виявлення дронів Robin
- 2.4. Інтегрований комплекс моніторингу навколишнього простору
 - 2.4.1. Оптико-електронні системи
 - 2.4.2. Радіолокаційні системи
 - 2.4.3. Акустичні датчики
 - 2.4.4. Аналізатори радіочастот (РЧ).

РОЗДІЛ 3. ІНФРАЧЕРВОНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

- 3.1. Характеристика інфрачервоного випромінювання повітряних об’єктів
- 3.2. Основні закони ІЧ випромінювання
- 3.3. Інфрачервоне випромінювання силових установок
- 3.4. Вплив атмосфери на розповсюдження інфрачервоного випромінювання
- 3.5. Розрахунок дальності виявлення високотемпературних об’єктів
- 3.6. Виявлення тепlopеленгатором низькотемпературних об’єктів

ВИСНОВКИ.....

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

| | |
|-------------|--|
| ЛА | Літальний апарат |
| АТС | Air traffic control (Керування повітряного руху) |
| ПС | Повітряне судно |
| РЛС | Радіолокаційна станція |
| ІЧ | Інфрачервоне (випромінювання) |
| БПЛА | Безпілотний літальний апарат |

ВСТУП

Актуальність теми.

У світі стрімко зростає використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Чимало з них служать для розвідки та ураження наземних об'єктів. Відповідно, дуже важливо виявити такі БПЛА якомога раніше, на підльоті. Для виявлення БПЛА традиційно використовують радіолокаційні, радіотехнічні, телевізійні, тепловізійні чи акустичні системи, які відстежують відбиті та випромінені радіосигнали, оптичні енергетичні контрасти у видимому та інфрачервоному діапазонах спектра, звукові сигнатури. Але сучасні БПЛА є малопомітними (малі розміри, тихі електричні двигуни), а якщо БПЛА застосовує автономні системи навігації то виявити його вкрай важко

Тому існує необхідність використовувати комбіновані засоби виявлення БПЛА. Так, як майже всі БПЛА рухаються за допомогою двигунних установок, тобто теплових чи електричних машин, їх можна виявляти за тепловим випромінюванням в додаток до радіолокаційного виявлення. Таке комбіноване виявлення двома різними за принципом дії датчиками збільшить імовірність виявлення та степінь захисту від БПЛА.

Об'єкт дослідження: процес виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів

Предмет дослідження: оптико-електронна система огляду повітряного простору

Мета роботи: дослідити можливості застосування інфрачервоних систем огляду повітряного простору для виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів

Методи дослідження: використання елементів теорії статистики, порівняльний аналіз, обробка літературних джерел.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ТА ХАРАКТЕРНІ ОЗНАКИ МАЛОРОЗМІРНИХ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ

Станом на сьогодні кількість сфер застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) швидко зростає. Багато з них стали доступними для звичайних користувачів. Виявлення координат БПЛА є критично важливими для захисту від їх незаконного використання, для запобігання зіткнення БПЛА з іншими літальними засобами, у випадках навігації кількох БПЛА при виконанні моніторингу навколишнього середовища, нагляду та розвідки ландшафту.

1.1. Використання безпілотних літальних апаратів

Роботи, спрямовані на створення безпілотних літальних апаратів, почалися давно ще в роки першої світової війни. У 1930-ті роки з'явилися перші дистанційно-пілотовані повітряні мішені. А під час другої світової війни з'являється перший ударний безпілотний літак - німецький літак-снаряд Фау-1. Згодом ударні літаки-снаряди великої дальності відносили до крилатих ракет і не називали безпілотними літаками. Наприкінці 1950-х років з'являються безпілотні розвідники. 70-ми роками ХХ століття датуються науково-дослідні розробки і в галузі бойових (ударних) БПЛА, а також безпілотних літаків з великою висотою і тривалістю польоту, призначених для тривалого спостереження і використання у складі розвідувально-ударних комплексів. У 1970-х - 1980-х роках цією тематикою займалися ведучі авіабудівні конструкторські бюро Радянського Союзу.

Так, в КБ ім. О.М. Туполева було створено безпілотні розвідники "Ястреб", "Стриж", "Рейс", а також спільно з НДІ "Кулон" створено безпілотний ударний комплекс "Коршун". У КБ ім. А.С. Яковлева спроектовано комплекс "Бджола".

БПЛА все більше знаходять широке застосування і в інших видах діяльності людини. Наприклад, у сільському господарстві БПЛА використовуються для запилення рослин на полях. При цьому досягається значна економія хімікатів і більш ретельна обробка посівів порівняно з пілотованою авіацією. Вони використовуються для доставки медикаментів і гуманітарних вантажів у важкодоступні райони, можуть застосовуватися для перевірки ліній

електропередачі трубопроводів. Дрони, інша назва БПЛА, можуть використовуватися і державною службою з надзвичайних ситуацій для моніторингу та прогнозування, а також під час контролю небезпечних об'єктів (безпека й охорона довкілля) та багато інших.

Зокрема, як несучу платформу метеорологічних вимірювальних комплексів для дослідження атмосферного прикордонного шару можуть використовуватися БПЛА мультикоптерного типу. Вони мають переваги по відношенню до БПЛА літакового типу, які, з огляду на високу швидкість переміщення в атмосфері, не забезпечують достатньої просторової та часової роздільної здатності вимірювань, мають низьку чутливість, не дають змоги досліджувати турбулентні процеси. Наразі доступні та відносно недорогі мультикоптери забезпечують підйом із корисним навантаженням 3 - 5 кг на висоту 2 - 4 км за тривалості польоту 30 - 40 хв. У сучасних БПЛА бортова система навігації та управління може забезпечувати:

- політ за заданим маршрутом (завдання маршруту проводиться із зазначенням координат і висоти прольоту поворотних пунктів маршруту);
- зміна маршрутного завдання або повернення в точку старту за командою з наземного пункту управління;
- обліт зазначеної точки;
- стабілізацію кутів орієнтації БПЛА, - підтримання заданих висот і швидкості польоту (шляхової або повітряної),
- збір і передавання телеметричної інформації про параметри польоту і роботу цільового обладнання,
- програмне керування пристроями цільового обладнання.

Усе це дає змогу забезпечити більшу мобільність і оперативність вимірювань за невисокої вартості експлуатації БПЛА. До основних переваг БПЛА мультикоптерного типу можна віднести:

- прямі контактні вимірювання (наприклад метеорологічних і турбулентних характеристик атмосфери);
- висока просторова і часова роздільна здатність;
- хороша завадозахищеність;

- невеликі вага і габаритні розміри пристрою;
- відносно невисока ціна.

Основні недоліки технології БПЛА мультикоптерного типу:

- невелика тривалість роботи (20 - 40 хв);
- відносно низька вантажопідйомність несучої платформи.

Незалежно від сфери застосування, повномасштабне виконання місій БПЛА може включати такі підзадачі, як виявлення, локалізація та ідентифікація цілей, супровід і цілевказування. Як свідчать різні джерела інформації, наразі в нашій країні та за кордоном за результатами оцінки внеску різних технічних засобів в ефективність бойових дій угруповань збройних сил пріоритети віддано засобам отримання розвідувальної інформації. Повітряна розвідка справедливо вважається одним із найнебезпечніших бойових завдань. Цілі, що підлягають розвідці, супротивна сторона прагне приховати і захищає їх потужною об'єктовою і військовою ППО. Особливо небезпечна повітряна розвідка в початковий період бойових дій, коли ППО противника ще не порушена, а також за відсутності панування в повітрі. Тому особливої актуальності набуває використання комплексів на основі безпілотних літальних апаратів для повітряної розвідки.

У більшості перерахованих випадків актуальним стає завдання виявлення БПЛА різних типів у повітрі.

1.2 Стан розвитку безпілотних літальних апаратів в Україні

На сьогодні більше ніж 30 країн світу розробляють, використовують та експортують БПЛА. За часи незалежності України жодне міністерство не закінчили повну розробку БПЛА, попри наявні наукові, промислові організації, які здатні розробляти та виготовляти безпілотні літальні апарати. Нині в Україні експлуатуються військові БПЛА радянського виробництва, які вже значно відстають від сучасних моделей таких пристроїв і потребують заміни або дорогого фінансування на ремонт і модернізацію.

Головними проблемними факторами розвитку безпілотних літальних апаратів в Україні є досить обмежені замовлення з боку державних органів безпеки.

Ускладненнями, які затримують розвиток БПЛА в Україні, є:

- відсутність фінансування на підприємствах, що займаються розвитком та виготовленням БПЛА;
- недосконале забезпечення виробництва, сертифікації, ліцензування, експлуатація;
- технічні основи обслуговування, ремонт обладнання;
- низький рівень застосування науково-технічного та виробничого потенціалу співпраці з міжнародними партнерами, зокрема членами НАТО та ЄС;
- скорочення якості кваліфікованих фахівців.

З початку збройної агресії Росії проти України збройні сили України не мали своїх сучасних безпілотних літальних апаратів. Наявні Ту-141 "Стриж" були застарілими, тому виникла гостра потреба в безпілотних літаках-розвідниках. Спочатку задовольняти цю потребу взяли добровольці, пристосовавши цивільні апарати до військових вимог [21-22].

Згодом були створені БПЛА "Фурія" (рис. 1.1), "Кажан-1" (рис. 1.2), PD-1.

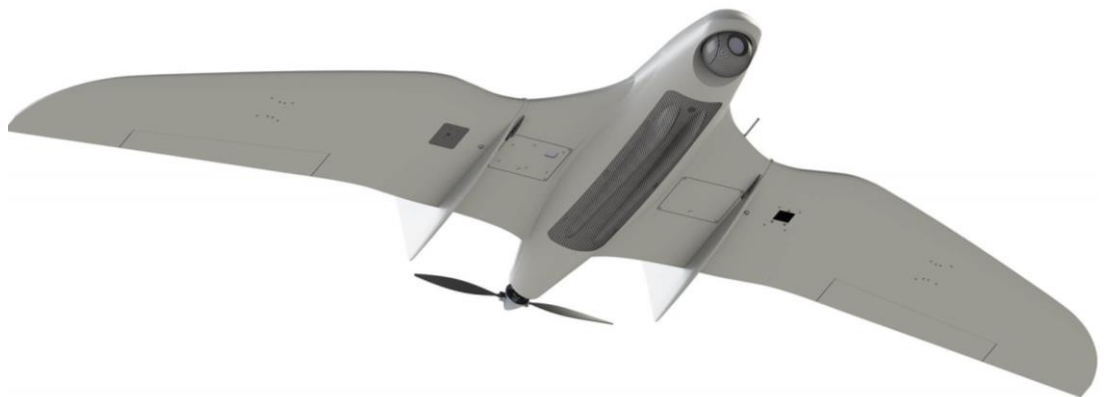


Рис. 1.1 - Безпілотний авіаційний комплекс А1-СМ "Фурія", розроблений київським підприємством «АлтонАвіа».



Рис. 1.2.Безпілотний авіаційний комплекс People'sDronePD-1

В серпні 2015 року державний концерн «Укроборонпром» почали серійне виробництво 2-х зразків вітчизняних БПЛА [23].

1.3 Типи БПЛА

Усі наявні БПЛА можна класифікувати за їх властивостями і конструктивним виконанням рис. 1.3. [<https://www.ukrmilitary.com/2020/03/nato-uav-standart.html>].



| Класифікація безпілотної авіації НАТО  | | | | | |
|---|-------------------|---------------------|-------------|-------------------------------------|----------------------|
| Клас | Категорія | Висота застосування | Радіус дії | Рівень застосування | Приклад |
| Клас I (< 150 кг) | малі >15 кг | до 1500 м | до 50 км | батальйон, полк | Scan Eagle |
| | міні < 15 кг | до 900 м | до 25 км | рота, взвод, відділення | Skylark |
| | мікро < 66 Дж | до 60 м | до 5 км | взвод, відділення, індивідуально | Black Hornet Nano |
| Клас II (150-600 кг) | тактичні | до 5500 м | до 200 км | бригада | Hermes 450 |
| Клас III (>600 кг) | ударні/ бойові | до 20000 м | до 6000 км | театр БД | MQ-9 Reaper |
| | MALE | до 13700 м | необмежений | спільна цільова група | Heron |
| | HALE | до 19800 м | необмежений | театр БД | Global Hawk |

Рис. 1.3. Класифікація БПЛА

Мікро-БПЛА зазвичай виготовляються за класичною аеродинамічною схемою, рідше користуються конструкцією «летюче крило». За розміщенням крила, воно високе. Також є і літаки з поперечним V крилом. Електродвигуни, в основному буксирні. Горизонтальне оперення — прямокутне, розміщений низько щодо вертикалі. Ці БПЛА злітають з рук, а посадку здійснюють із парашутом.

Міні-БПЛА виготовляються за класичною аеродинамічною схемою. Крило розташоване високо. Корпуси представлені у вигляді гондол та однокорпусних схем. Вертикальне оперення представлено одно плавниковим, подвійно плавниковим інтервалом, рідше V-подібним. Двигуни, як правило, поршневі, штовхаючі або що тягнуть. Зліт виконується з ракет-носіїв, а посадка виконується парашутом або літаком.

Міди-БПЛА відрізняються від міні-БПЛА лише тим, що виконують зльоти та посадки, подібні до літака, мають фіксовану триколісну шасі з опорою для носа та поршневіми двигунами.

Максі-БПЛА виготовляються відповідно до класичного аеродинамічного дизайну. Крило розташовано низько. Оперення мають V-подібну форму. Двигуни штовхаючі та представлені у вигляді реактивних, турбінних двигунів. Вони мають висувне шасі. Зліт і посадка виконується, як у літаків.

БПЛА розрізняються між собою за вагою (наприклад, від транспортних засобів, які важать пів кілограма до гігантів, вагою - 10-15 тонн), висотою та за часом у польоті. Безпілотники, які важать до 5 кг належать до класу "мікро", тому і мають можливість злетіти з будь-якої невеликої площадки та навіть від руки. Вони можуть злетіти на висоту 1 - 2 км, і перебувати в повітрі до однієї години. Їх використовують для розвідки, наприклад, для виявлення в горах чи лісовій місцевості терористів і військової техніки.

«Міні» безпілотники які важать до 150 кг можуть працювати на висоті до 5 км, а час польоту триває 3-5 годин. Приклад представлений на (рис. 1.4):



Рис. 1.4 - Розвідувальний БПЛА RQ-11 Raven компанії AeroVironment Inc.

Наступні за класифікацією - «міди». Це важкі багатоцільові літальні апарати вагою від 200 до 1000 кг. Можуть здійснювати політ до 5 - 6 км, час польоту - 10 - 20 годин. Приклад якого на (рис. 1.5):



Рис. 1.5 - Багатоцільовий американський БПЛА MQ-1 Predator компанії General Atomics Aeronautical Systems.

"Максі" – БПЛА транспортні засоби (рис. 1.6). Вони вагою від 1000 кг до 8-10 тонн. Їх стеія становить 20 км, в польоті можуть перебувати більш як 24 години.



Рис. 1.6. Розвідувальний американський БПЛА RQ-4 Global Hawk, компанії Northrop Grumman

БПЛА «супермаксі», швидше за все, з'являться найближчим часом. Існують думки, що їх вага перевищить 15 тонн. Такі "важкі вантажні транспортні засоби" будуть перевозити на борту велику кількість обладнання різного за призначенням і виконуватимуть найширший спектр завдань.

1.4. Переваги та недоліки застосування БПЛА

Перевагами при використанні безпілотних літальних апаратів є те що присутність пілота в літаку не завжди потрібна. Наприклад, відео та фото фільмування, установка радіоперешкод, корекція вогню. Це означає, що навантаження на фюзеляж літального апарату суттєво менша, що забезпечує менше жорсткість конструкції. Крім того, ці літальні апарати більш живучі, непомітні, маневрові та оперативні, тобто не вимагають розгортання засобів підтримки, необхідних для дій пілотованих літаків. Також використання БПЛА не пов'язане з ризиком втрати екіпажу на тренуванні для порятунку у випадку аварії, тому це не займає багато часу та матеріальних засобів.

Недоліком використання БПЛА є той факт, що при відсутності сигналів супутників зв'язку та навігації, порушуються канали зв'язку та функції роботи БПЛА, оскільки, вони виходять з-під контролю і навіть можуть потрапити під контроль ворога. Слід також зазначити, що низька швидкість, вразливість протиповітряної оборони, нездатність вести повітряний бій та слабке озброєння, теж є недоліками БПЛА які можуть зменшуватись при удосконаленні енергетичних засобів та силових установок.

1.5. Канали виявлення БПЛА

Інформацію для виявлення і подальшого супроводу БПЛА може бути отримано шляхом приймання спеціальними засобами відбитої і випромінюваної енергії у всіх діапазонах спектра електромагнітних і акустичних хвиль.

Будь-якому матеріальному об'єкту, зокрема й БПЛА, притаманні демаскувальні ознаки, які виділяють його в навколишньому середовищі, роблячи його помітним для спостереження. Нині ступінь помітності визначають значенням його сигнатур у радіочастотному, інфрачервоному (ІЧ) та видимому діапазонах спектра, а також акустичною сигнатурою. Сучасні легкі БПЛА мають сигнатури невеликого значення: їх виготовляють із використанням композитних матеріалів і пластику зі спеціальним забарвленням і особливою комбінацією шарів; невеликі бензинові або електричні двигуни випромінюють мало тепла і працюють майже безшумно.

Значне розмаїття можливих варіантів побудови та використання засобів спостереження в кожному із зазначених діапазонів зумовлює труднощі оцінювання їхньої ефективності.

Акустичний канал. Сумарний спектр акустичного випромінювання тактичного БПЛА обумовлений гармонійними і широкосмуговими складовими. Він містить гармонійні випромінювання, що залишають випромінювання двигуна, шуму обертів гвинта, випромінювання механічної природи, а також високочастотну і низькочастотну складові шуму двигуна з безперервними за частотою спектрами. У шумі силової установки БПЛА, що має поршневий двигун повітряного охолодження, за відсутності в його вихлопному тракті глушника визначальним джерелом зовнішнього шуму є поршневий двигун.

Оптичний канал. Оптичне виявлення БПЛА дуже залежить від факторів навколишнього середовища. Збільшення дальності виявлення досягається за рахунок звуження поля зору, зменшення зони огляду та збільшення часу пошуку. Тому візуальні сенсори є неефективними пристроями для проведення пошуку. При надходженні зовнішніх цілевказів від більш ефективного пошукового засобу оптичні сенсори можуть бути ефективно використані для супроводу БПЛА. Оскільки безпілотники є значно меншими за розмірами порівняно з пілотованими засобами, то це ускладнює їх виявлення за допомогою оптичних засобів. Порівняно з літаком контрастність БПЛА відносно фону є меншою через відсутність світлових маяків, зменшений факел малого двигуна та меншу поверхню відбиття.

ІЧ канал. Тепло від БПЛА виділяється, в основному, силовою установкою і, меншою мірою, електронними компонентами, а також точками гальмування на несучих краях крил, пропелерів і гвинтів. Розробники безпілотників намагаються попередити випромінювання в ІЧ-діапазоні в напрямку розміщених на землі приймачів і спрямувати це випромінювання в бік неба. Крім того, використовують матеріали з малою випромінювальною здатністю, такі як срібло та алюміній [16]. У цьому разі можливість БПЛА бути виявленим визначається його випромінювальною здатністю, контрастом і площею випромінювання.

Радіоканал. Пошук БПЛА за допомогою активних радіолокаційних станцій досить продуктивний, тому що вони мають відносно великий імпульсний обсяг пошуку і значну дальність виявлення. Однак РЛС можуть бути визначені противником за власним випромінюванням. Радіолокаційне виявлення БПЛА може бути прийнятним тільки тоді, коли не ставляться вимоги до скритності роботи або високої мобільності. Як уже зазначалося, більшість БПЛА виготовляють із композитних матеріалів, які досить погано відбивають електромагнітні хвилі. Радіохвилі проникають через поверхню безпілота і лише частково відбиваються від неї.

Канал радіорозвідки. БПЛА можуть бути виявленими і засобами радіотехнічної розвідки шляхом приймання й аналізу радіосигналів ліній зв'язку та управління, радіолокаційних висотомірів, постановників активних перешкод і радіолокаційних станцій. Однак цим методом можна встановити лише напрямок на БПЛА, причому точність визначення підвищується при збільшенні часу спостереження. Деякі низькочастотні лінії зв'язку можуть бути виявлені на значних дальностях. Випромінювання бортових РЛС і встановлення активних перешкод БПЛА можуть бути виявлені на ще більших дальностях. Цей метод вимагає мінімального обладнання і дає змогу швидко визначити пеленг цілі під час подальшої видачі цілевказівки на засоби оптичного або ІЧ спостереження.

Перспективним напрямом надійного виявлення БПЛА є комплексування інформації, яка надходить каналами різної фізичної природи.

1.6. Методи виявлення БПЛА

Повсюдне використання малих БПЛА крім, безсумнівно, позитивних сторін породило ряд проблем, пов'язаних з неадекватною поведінкою деяких власників БПЛА, несанкціонованим моніторингом об'єктів і територій державної ваги, збільшенням випадків вторгнення в особисте життя, виникненням можливості використання БПЛА в терористичних і розвідувальних цілях. Незалежно від сфери застосування, повномасштабне виконання місій БПЛА може включати такі підзадачі як виявлення, локалізація і ідентифікація цілей,

супровід і цілевказування. У більшості перерахованих випадків досить актуальною стає задача виявлення БПЛА в повітрі.

Найбільшу вразливість БПЛА обумовлює наявність у них електромагнітного випромінювання. До електромагнітних демаскуючих ознак належать: сигнали бортового відповідача; сигнали радіолокаційних станцій, відбиті від фюзеляжу і складових елементів БПЛА; сигнали ретрансляторів, ширококомовних станцій, базових станцій стільникового зв'язку, відбиті від БПЛА; команди і «відповіді» каналу управління між наземним пунктом управління і БПЛА, а також між БПЛА і супутником-ретранслятором системи навігації; сигнали бортовий РЛС бокового огляду; канали обміну розвідувальною інформацією; сигнали системи автоматичної посадки на аеродром.

Основними способами виявлення БПЛА в електромагнітному спектрі є: використання тепловізора інфрачервоного діапазону електромагнітних хвиль, використання камер оптичного діапазону; використання радіолокаційних станцій; здійснення радіомоніторингу.

На сучасному етапі існують різні методи виявлення БПЛА. Розглянемо їх класифікацію:

- акустичне виявлення;
- оптичне виявлення;
- за тепловим випромінюванням;
- радіолокаційне виявлення;
- радіочастотне (RF) виявлення;
- виявлення за Wi-Fi сигналів.

До акустичного виявлення відносяться зовнішні звуки, які при роботі видає безпілотний літальний апарат. В даний час проводиться багато акустичних досліджень в цій області, тому ці звуки відслідковуються, фільтруються і є можливість перевірки існуючого сигналу по базі даних (БД) відомих звукових сигнатур БПЛА. Однак, цей метод може бути ненадійним в шумному середовищі, таких як міські райони, залізничні вузли та іншу транспортні артерії і багато хто з БПЛА вищого рівня модифікуються спеціальними гвинтами і двигунами, які можуть вплинути на їх звукову ідентифікацію.

Оптичне виявлення. В цій формі виявлення використовується камера, яка визначає місцезнаходження рухомого повітряного об'єкта і намагається розрізнити БПЛА і птахів за розміром, траєкторії польоту і стилю руху. Пластиковий кожух, що захищає внутрішню роботу дрона, не є теплопровідником, і двигун дрона виробляє набагато менше тепла, ніж двигуни великих повітряних суден. Однак літєвий акумулятор, який живить більшість споживачів БПЛА, виробляє достатню кількість тепла, щоб його можна було зафіксувати за допомогою інфрачервоної камери. Інфрачервоні камери застосовують визначення різниці температур і можуть виявляти об'єкти в повній темряві без додаткового освітлення тобто пасивними системами, що робить їх ідеальними для використання вночі або в холодну пору року.

Виявлення за тепловим випромінюванням визначає теплову сигнатуру БПЛА, але через те, що більшість БПЛА виготовлено з пластика, він випромінює мінімальну теплову сигнатуру.

Радіочастотне (RF) виявлення- виявлення включає в себе моніторинг частот 2,4 ГГц і 5,8 ГГц для передачі сигналів до або від БПЛА.

Виявлення за Wi-Fi сигналів можливо, так як багато комерційних безпілотних літальних апаратів початкового рівня мають ідентифікатори SSID і MAC-адреси, які транслюються Wi-Fi каналом.

Радіолокаційне виявлення може забезпечити ефективне виявлення присутності дронів на великій відстані. Його можна успішно поєднати з іншими технологіями, такими як RF або оптичне виявлення, щоб забезпечити більш ретельне покриття. Радіолокаційна система має передавач, який випромінює зондуєчі радіохвилі, які або відбиваються назад у бік передавача, або розсіюються об'єктами, з якими вони стикаються. Спотворені хвилі повертаються до радіолокаційного приймача, де алгоритми перетворюють їх у візуальний екранний формат, що дає уявлення про форму, розмір та щільність матеріалів об'єкта. Більшість аеропортів використовують комбінацію радарів L-діапазону для дальнього виявлення або S-діапазону для ближнього виявлення або радіолокатори управління повітряним рухом. Але оскільки дрони набагато менші за будь-який літак або вертоліт, вони потребують іншого підходу.

Тому Радіолокатори К та Х діапазонів часто використовуються для повітряного спостереження, включаючи виявлення БПЛА, причому кращим є Х діапазон, оскільки його коротші довжини хвиль (8 - 12 ГГц) забезпечують вищий рівень видимості та більш пристосовані для виявлення малорозмірних об'єктів.

Наприклад імпульсно-доплерівський радіолокатор виявляє об'єкт, який рухається до або від радіолокаційного передавача, чим створює "ефект Доплера" –що полягає у зміні частоти відбитого сигналу в залежності від швидкості та напрямку руху. Імпульсно-доплерівська радіолокаційна система виявлення дронів періодично випромінює радіохвилі та вимірює частоти у відбитому радіосигналі для оцінки відстані, швидкості та характеристик виявленого об'єкта. Проте дрони в основному виготовляються з пластику, який невидимий для радарів, і лише їх металеві конструкції, акумулятори та двигуни забезпечують платформу для відбиття радіолокаційних сигналів.

Дрони менше, ніж пілотовані літаки, і вони, як правило, літають близько до землі, що ускладнює їх виявлення для всіх, крім спеціалізованіших антидронових радіолокаторів. Такі системи дійсно існують, але вони часто викликають додаткові проблеми, такі як велика вартість, велика кількість помилкових тривог та вплив зовнішніх природних завад.

Найефективнішими радіолокаційними системами виявлення БПЛА є спеціалізовані моделі Х-діапазону мікроімпульсні доплерівські радіолокатори.

Птахи завдяки своїм порівняно малим розмірам та характеристикам польоту, як правило, створюють багато помилкових тривог, потрапляючи в поле зору антидронових радіолокаторів. Потенційні перешкоди - активний характер радара і той факт, що деякі комунікації використовують однакові частоти, можуть означати ненавмисне втручання в місцеві трансляції та необхідність отримання ліцензії на експлуатацію системи.

Перевагами антидронових радіолокаторів є: постійне кругове або направлене покриття, відстеження дронів та БПЛА літакового типу, виявлення багатьох БПЛА одночасно. До недоліків можна віднести: високу частоту помилкових тривог, не вдається виявити нано-дрони. може заважати

навколишньому спілкуванню, може вимагати дозволу від місцевих органів влади.

1.7. Аналіз існуючих заходів протидії БПЛА

В даний час існує безліч задокументованих методів, порушення роботи або захоплення БПЛА, від фізичних до цифрових атак.

Балістична - відключення БПЛА за допомогою снаряда, наприклад, Пейнтбольний пістолет, дробовик.

Потужний лазер для плавлення компонентів БПЛА.

Заглушка - доступні кілька методів для придушення інструкцій у напрямку або позиційних даних, одержуваних БПЛА. Більшість пристроїв для придушення перешкод мають обмежену дальність дії (до 30 м), проте військова техніка здатна придушити великі області RF, 3G/4G, Wi-Fi і GPS. Наприклад, в 2012 році Північна Корея завадила прийому GPS в Південній Кореї.

Мікрохвильова гармата - виробляє сфокусований промінь енергії, призначений для руйнування внутрішніх компонентів.

Звук - використання певних частот звуку для порушення внутрішньої роботи БПЛА.

БПЛА завади. Наприклад спеціально розроблені БПЛА, які заважають Wi-Фізв'язку, порушують мережі або використовують тактику камікадзе для відключення інших БПЛА, вриваючись в них.

Угон - захоплення БПЛА виявився успішним завдяки використанню атак деаутентифікації, які порушують зв'язок між БПЛА і контролером та встановлюють нове з'єднання із зловмисником.

Спуфінга - методи спуфінга RF або GPS можуть використовуватися для передачі неправдивої інформації на БПЛА.

Хмарні атаки - доступний набір програмного забезпечення для управління, яке дозволяє комерційним компаніям, що виробляють БПЛА, дистанційно керувати парком БПЛА.

Великий обсяг БПЛА викликає зростаючу потребу в рішеннях для захисту від дронів. Загрози безпеці, пов'язані з безпілотними літальними апаратами,

створюють ще більш широку потребу в спеціальних пристроях для виявлення дронів.

Оцінюючи переваги та недоліки розглянутих фізичних каналів та методів виявлення БПЛА, можна дійти висновку, що для виявлення малорозмірних і малошвидкісних безпілотників (мікро-БПЛА), так званих БПЛА широкого застосування необхідно провести аналіз датчиків технічного огляду повітряного простору.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ

Не дивлячись на те, що безпілотні літальні апарати (БПЛА, також відомі як дрони) привертають широку увагу в різноманітних цивільних і комерційних цілях, вони, безсумнівно, становлять низку загроз для безпеки повітряного простору, які можуть загрожувати людям. Незважаючи на те, що такі загрози можуть бути дуже різноманітними з точки зору намірів зловмисників і їхньої складності, починаючи від невміння пілота до навмисних атак, усі вони можуть призвести до серйозних збоїв. Їх частота також зростає: у перші кілька місяців 2019 року, наприклад, різні аеропорти в США, Великобританії, Ірландії та ОАЕ зазнали серйозних збоїв у роботі через спостереження дронів [1]. Класична теорія ризику говорить нам, що небезпеки, імовірність яких є високою, а наслідки серйозними, породжують величезні ризики (оцінка ризику = ймовірність × вплив). Органи керування повітряного руху (КПР) в усьому світі наполегливо працюють над зменшенням ймовірнісного аспекту рівняння ризику, регулюючи роботу дронів. Правила можуть перешкоджати необережному чи некваліфікованому керуванню безпілотниками, але не можуть запобігти злочинним чи терористичним атакам.

За прогнозами аналітиків, до 2035 року у світі буде більше 10 млн. дронів. Ці повітряні об'єкти масою від декількох грамів до десятків кілограм надзвичайно складно фіксувати органами КПР, а їх раптова поява може бути критичною для літака, призвести до пошкодження його конструкції та відмови критичних систем. Як наслідок - до авіакатастроф.

Виходячи з цих чинників, питання виявлення та моніторингу БПЛА являється надзвичайно актуальним і важливим для підтримання безпеки повітряного руху.

На сьогоднішній день всі літаки вагою понад 3500 кг оснащуються системами попередження зіткнень типу TCAS.

2.1. Система попередження запобігання зіткнень TCAS

Traffic Collision Avoidance System (TCAS) — це автономна бортова система запобігання зіткненням, сертифікована ІКАО та призначена для допомоги екіпажам літаків у запобіганні зіткненням у повітряному просторі.

Принцип роботи системи TCAS полягає в наступному. Система працює за принципом вторинної радіолокації, незалежно від будь-якого бортового навігаційного обладнання та наземних систем. TCAS стежить за іншими літаками поблизу, опитуючи їх відповідачі КІР. Система TCAS формує навколо літака захисну частину повітряного простору, що складається з двох частин: зони попередження «Warning Area» та зони підвищеної уваги «Caution Area» (рис. 2.1). Розміри цих зон змінюються в залежності від висоти і швидкості польоту. Система забезпечує захист літака від вторгнення інших літальних апаратів оснащених відповідачами КІР на основі швидкості їх зближення, аналізу по відстані і по висоті.

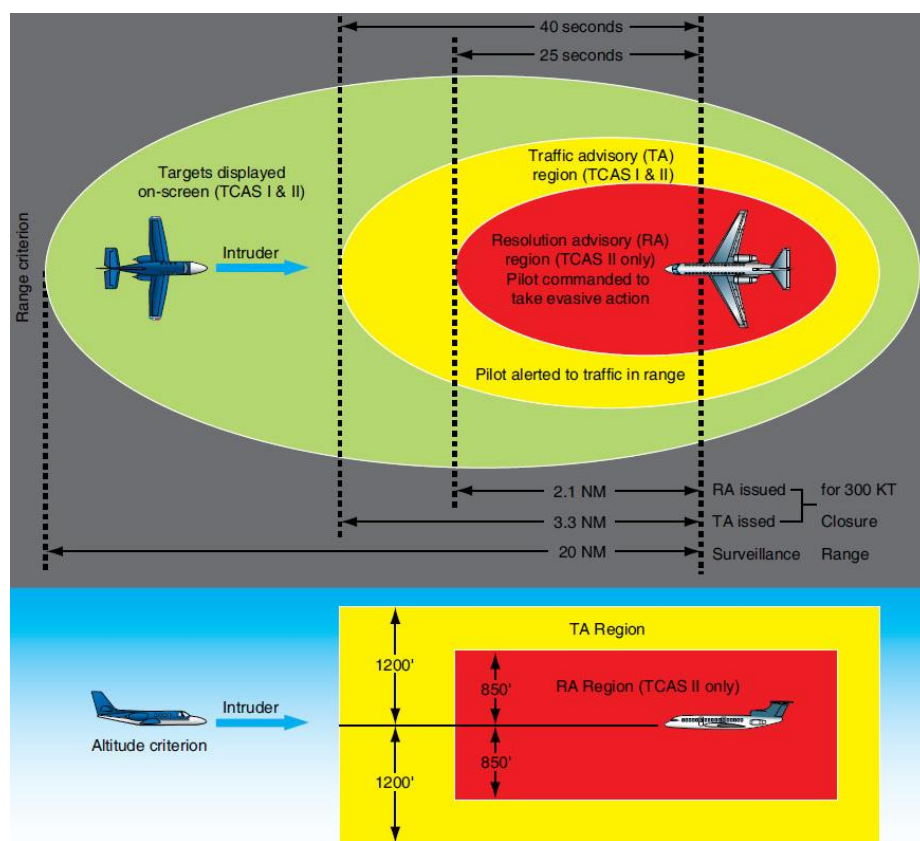


Рис. 2.1. Зони дії системи TCAS

2.2. Система виявлення та уникнення ДАА

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

вбудовані системи запобігання зіткнення.

Небезпечні ситуації, коли безпілотні літальні апарати наближаються до літаків чи інших БПЛА, можуть виникати при великих швидкостях. Тому покластися лише на візуальний контроль ненадійно. Таким чином була розроблена система виявлення та уникнення DAA (Detect-And-Avoid-System), щоб уніфікувати такі небезпечні ситуації.

Ця система складається з двопанельної активної антени з електронним скануванням (див. рис. 2.2), яка дозволяє визначати та відстежувати повітряні судна в зазначеній зоні огляду. Бортовий радар дозволяє відстежувати одночасно кілька об'єктів і продовжувати пошук нових. Це є ключовою складовою системою бортового обладнання виявлення та уникнення DAA.

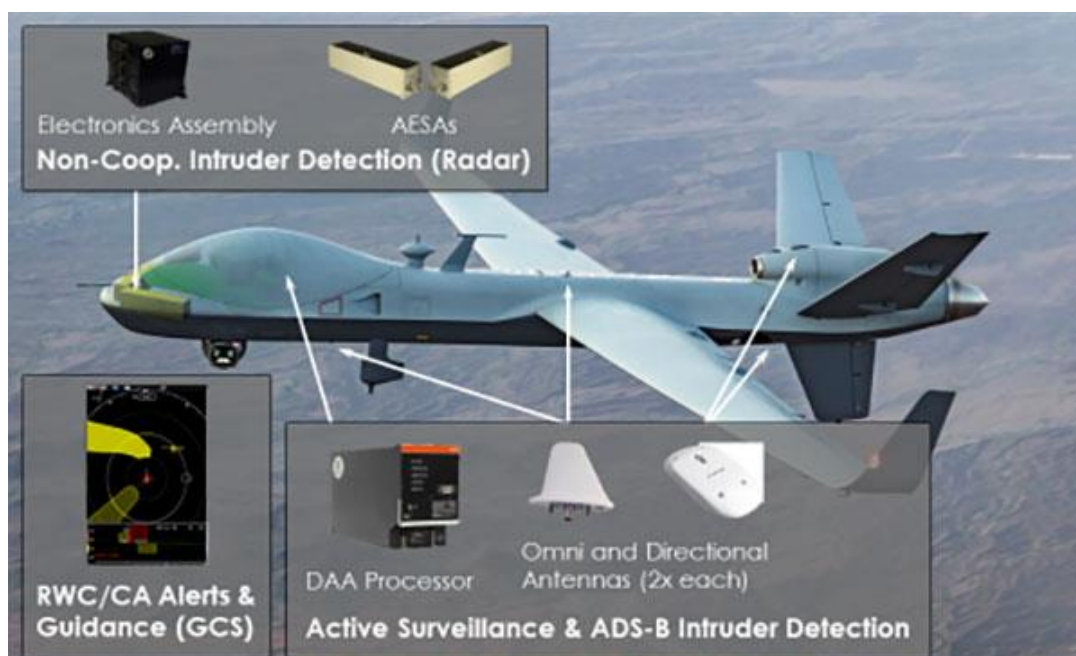


Рис. 2.2. Бортовий радар DAA

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

1. Виявлення та супроводження небезпечних повітряних суден з оцінкою їх ступеня небезпечної активності.
2. Виявлення небезпечних ситуацій.
3. Запобігання конфліктним ситуаціям шляхом побудови безпечних маршрутів ухилення та виконання маневрів ухилення.

Система DAA включає кілька підсистем, які вирішують конкретні

завдання:

1. Бортовий радар (Due Regard Radar, DRR) призначений для виявлення повітряних суден без відповідного обладнання АТС.

2. Система запобігання зіткнення TCAS, яка сумісна з технологіями цивільної авіації.

3. Супутникове автоматичне залежне спостереження (ADS-B) для передачі інформації про політ та отримання аналогічних даних від інших учасників повітряного руху.

4. Система прогнозування та відображення конфліктів (Conflict Prediction and Display System).

Система виявлення та уникнення (DAA) призначена для виявлення та уникнення зіткнення з іншими повітряними суднами. Однак, враховуючи те, що швидкість літаків перевищує швидкість БПЛА, а маса радіолокатора становить приблизно 70 кг, встановлення такої системи на легких та надлегких БПЛА є неможливим. Тому систему запобігання збитку необхідно встановити на важких БПЛА типу MQ-1 Predator.

Антенна DRR є ключовим компонентом загальної бортової архітектури Detect and Avoid (DAA) для Predator. Система DAA повинна виявляти та уникати кооперативних (тобто літальних апаратів, обладнаних транспондером) і некооперативних (тобто літальних апаратів, які не оснащені транспондером) літаків. Виявлення та відстеження кооперативних літаків здійснюється за допомогою системи запобігання зіткненням (TCAS) і автоматичного залежного спостереження-трансляції (ADS-B). Відстежуючи літаки, які не співпрацюють, DRR забезпечує можливість уникнення зіткнень дистанційно пілотованого літального апарату (Remotely Piloted Aircraft) та дозволяє оператору відокремити літак від іншого повітряного руху у співпраці з диспетчером керування повітряного руху (Рис. 2.3).

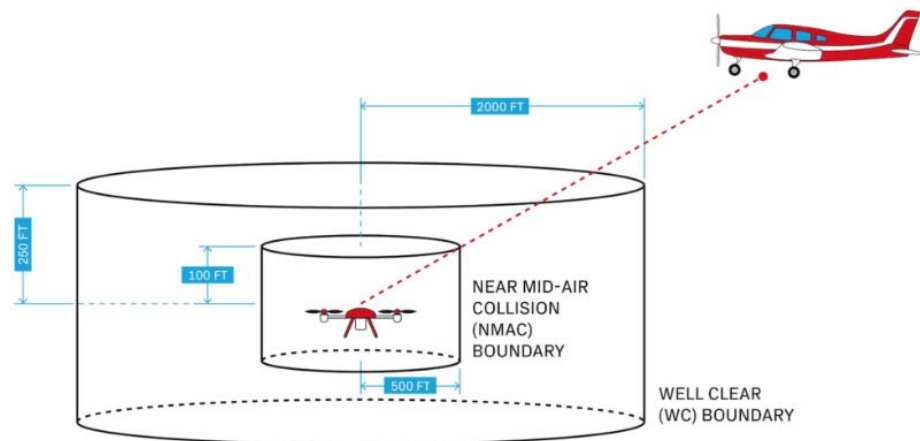


Рис 2.3. Схема захисних зон DAA

Легкі БПЛА не мають транспондерів АТС, тому вони не виявляються системами TCAS та не обладнуються системами DAA через їх надмірну вагу і енергоспоживання. Крім того, через їх малі розміри їх важко помітити візуально. Проте деякі типи легких БПЛА можуть підніматися на висоту 500 м і більше, розвиваючи швидкість понад 100 км/год, що створює загрозу для інших повітряних суден.

2.3. Наземні радіолокатори виявлення дронів Robin

Порушення повітряного простору у охоронних зонах (наприклад аеропорту) контролюються службами безпеки, які використовують радары виявлення БПЛА що є основним засобом моніторингу та виявлення небезпечної активності БПЛА на захищеній території. Прикладом таких систем є радіолокатори IRIS та ELVIRA компанії Robin Radar Systems. Радар виявлення дронів відстежує, виявляє та в деяких випадках класифікує дрони та інші невеликі об'єкти, які традиційні радары виявити не можуть. Моделі з дальньою класифікацією допомагають уникнути помилкових тривог від таких об'єктів, як птахи, і дають більше часу командам на реагування, якщо радар виявить дрон. 3D-технологія також особливо корисна, оскільки робить виявлення дронів більш точнішим.

Радіолокаційні інформаційні системи IRIS та ELVIRA забезпечують кваліфікацію птахів та БПЛА, зменшуючи навантаження на оператора, охоплюють повний кут огляду 360° та мають стандартну дальність виявлення 5 кілометрів. Вони можуть виявляти великі БПЛА з фіксованим крилом на відстані до п'яти кілометрів і малі багатороторні БПЛА коптерного типу на відстані до

трьох кілометрів. Радари забезпечують необмежене покриття завдяки об'єднанню декількох радіолокаційних пристроїв в інтегровану сенсорну мережу.

ELVIRA – це твердотільний FMCW радар X-діапазону, потужністю 4 Вт та швидкістю оновлення інформації-1,3 с, має поле огляду 360° та вагу 72 кг. (рис. 2.4)

IRIS - частотно-модульований мікродоплерівський радар неперервного випромінювання що може виявляти обертання лопатей вентилятора БПЛА та нерухомі (завислі) дрони. Також являється радаром X-діапазону, потужністю 24 Вт та швидкістю сканування 30об/хв. та частотою оновлення інформації-1 с, має поле огляду 360°x60° та вагу 25 кг Максимальна дальність виявлення3-5 км. (рис. 2.5)



Рис. 2.4. Радіолокатор виявлення дронів Robin ELVIRA



<http://jre.cplire.ru/jre/apr15/7/text.html>

2.4. Інтегрований комплекс моніторингу навколишнього простору

Під інтегрованим комплексом моніторингу (ІКМ) навколишнього простору розуміють сукупність спільно функціонуючих датчиків, засобів зв'язку, обчислювальних та програмних засобів, засобів управління та індикації, призначених для отримання інформації про різноманітні об'єкти, об'єднання інформації, що надходить від датчиків і відображення результуючої інформації. Кінцевою метою функціонування ІКМ є формування узагальнюючого уявлення про навколишній простір. Під навколишнім простором при цьому розумітимемо повітряний, наземний, водний, а іноді й підповерхневий простір або будь-яка їх сукупність, а під об'єктами – будь-які сутності матеріального світу, в тому числі, поодинокі малорозмірні об'єкти, групові об'єкти, розподілені (майданні та об'ємні) об'єкти. і т.д.

Найважливішу роль ІКМ грають інформаційні датчики, тактико-технічні характеристики яких визначають можливості високоефективного функціонування ІКМ. До датчиків, що забезпечують отримання інформації про навколишній простір для моніторингу дронів відносяться системи, що отримують інформацію на основі аналізу електромагнітного поля в різних діапазонах довжин хвиль:

- оптичні датчики (інфрачервоні, телевізійні, лазерні);
- системи активної та пасивної радіолокації;
- акустичні датчики (мікрофони);
- аналізатори радіочастот.

Інтегрована спільна обробка інформації, що отримується від декількох датчиків, дозволяє сформуванню зведених узагальнюючих відомостей про навколишній простір і прогноз його зміни.

Найбільш широке застосування при моніторингу навколишнього простору знайшли оптико-електронні і радіолокаційні датчики. Застосування у складі інтегрованих комплексів моніторингу цих датчиків значно підвищує можливості ІКМ щодо перешкодозахищеності, надійності та точності вимірювання

координат та параметрів руху повітряних, наземних та надводних об'єктів.

2.4.1. Оптико-електронні системи

Оптико-електронні системи (ОЕС) забезпечують формування зображень об'єктів навколишнього простору з урахуванням прийому електромагнітних коливань оптичного діапазону хвиль. Під оптичним випромінюванням розуміють електромагнітне випромінювання діапазоні довжин хвиль від $\lambda=10^{-3}$ мкм до $\lambda=1$ мм (рис. 2.6). Оптичний діапазон поділяється на ультрафіолетову область ($\lambda=10^{-3} \dots 0,38$ мкм), видиму ($\lambda=0,38 \dots 0,76$ мкм) та інфрачервону (ІЧ) область ($\lambda=0,76 \dots 103$ мкм).

ІЧ-область оптичного спектру випромінювання ділиться на короткохвильову ділянку ($\lambda=0,76 \dots 1,5$ мкм), середньохвильову ($\lambda=1,5 \dots 20$ мкм) і довгохвильову ($\lambda=20 \dots 103$ мкм). Слід зазначити, що межі цих діапазонів та ділянок є значною мірою умовними. Залежно від діапазону хвиль ОЕС мають різні інформативні можливості під час вирішення завдань моніторингу навколишнього простору.

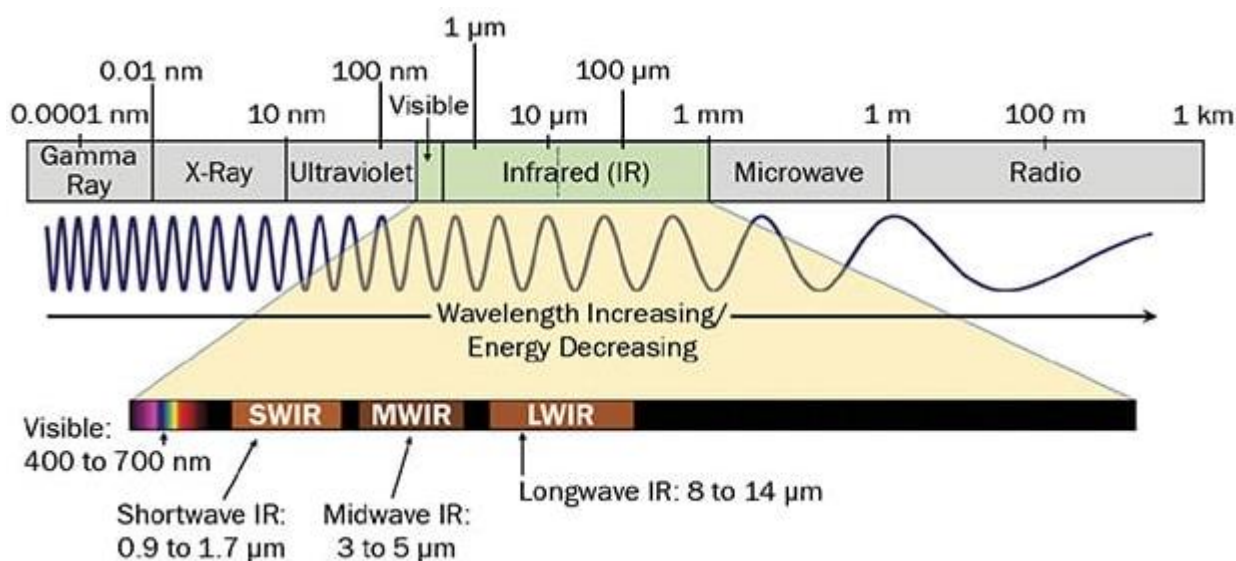


Рис. 2.6. Спектр електромагнітних хвиль

Пасивні оптикоелектронні датчики. До пасивних оптико-електронних датчиків відносять телевізійні та тепловізійні. Що стосується літальних апаратів (ЛА) найбільш відомими ІЧ-системами є системи FLIR (Forward Looking Infrared – інфрачервона система переднього огляду) таIRST (Infrared Search and Traking – ІЧ-система пошуку та супроводу).

Системи FLIR, що працюють у діапазоні довжини хвилі 8...13 мкм, стали

основним пасивним засобом літаків, що забезпечують навігацію та виявлення цілей (рис. 2.7).

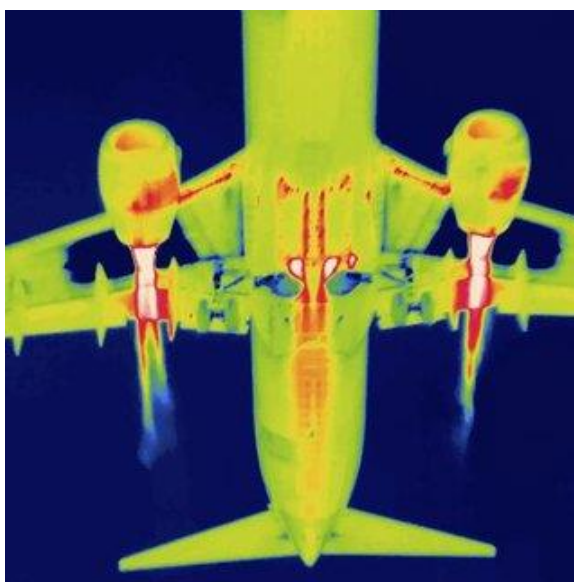


Рис. 2.7.Тепловізор FLIR та сформоване ним зображення.

ІЧ-система пошуку та супроводуIRST (рис. 2.8). є ефективним пасивним засобом виявлення цілей на великих дальностях та в широких зонах. Дальність її дії можна порівняти з дальністю дії деяких сучасних бортових радіолокаційних систем (РЛС) виявлення повітряних цілей. Однак системуIRST не можна розглядати як заміну бортової РЛС. Обидві системи взаємно доповнюють одна одну.

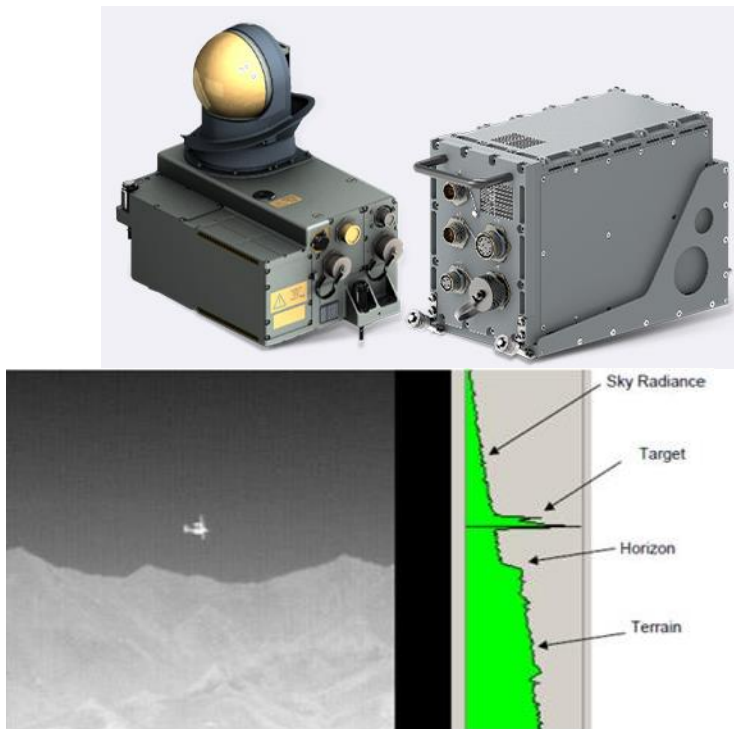


Рис. 2.8. Теплопеленгатор (IRST) та сформоване ним зображення.

Система IRST працює в середній та довгохвильовій ІЧ-області спектру в діапазонах довжин хвиль 3...5 та 8...12 мкм, де атмосферне ослаблення оптичних хвиль за нормальних умов є прийнятним. Система виявляє найменші зміни температури об'єктів та фону, але функціонування її значною мірою залежить від погодних умов. При дощі або густому тумані ефективність системи знижується, тому система IRST може бути ефективно використана лише за ясної погоди.

Система IRST виконує багато функцій бортової РЛС, до того ж вона меншою мірою вразлива від засобів радіоелектронної протидії. Обидві системи здатні сканувати у широкій зоні огляду, виявляти та супроводжувати цілі. РЛС забезпечує точне вимірювання дальності, тоді як система IRST, будучи пасивною, не може визначати дальності до об'єктів. У той же час система IRST видає більш точну інформацію про азимут і кут місця та має більшу здатність розпізнавання об'єктів.

У поєднанні з приймачем попередження про радіолокаційне опромінення система IRST може бути використана для отримання точної інформації про азимут та кут місця джерел загрози. За відсутності радіолокаційного опромінення система IRST може бути єдиним пасивним засобом виявлення

загрози. Система IRST також може бути використана як система попередження про наближення атакуючих ракет.

Між ІЧ-системою FLIR, що використовується для виявлення наземних цілей та навігації, і системою IRST існує ряд відмінностей. Так, за рахунок нижчої частоти сканування система IRST забезпечує триваліший процес накопичення сигналів, необхідний для дільнього виявлення.

Система FLIR може працювати з полем зору, що не перевищує , що забезпечується індикатором на лобовому склі ЛА. Система IRST повинна мати широке поле зору навколо , щоб здійснювати пошук цілей у можливо більш широкому секторі огляду. Іншою важливою відмінністю двох систем є різні вимоги до цифрової обробки даних. Для системи FLIR може не вимагатися жодної обробки, якщо зображення відтворюється безпосередньо на індикаторі, або потрібно обробка невеликого об'єму для покращення якості зображення та забезпечення наведення засобів ураження на ціль. Для системи IRST необхідна швидкість обробки даних близько 30 ... 40 млн. операцій за секунду для придушення перешкод та супроводу повітряних об'єктів.

З технічної точки зору система IRST є більш складною, проте вона може виконувати функції звичайної системи FLIR та працювати як комбінована система FLIR/IRST для пасивного спостереження, супроводу та розпізнавання цілей, навігації, а також забезпечення наведення зброї на наземні цілі та посадки.

Нині дедалі ширше застосування знаходять багатоспектральні оптико-електронні датчики. Перевагою використання кількох ОЕ/ІЧ-датчиків є їх взаємодоповнюючий характер: якщо деякі датчики «деградують», наприклад, через поглинання в атмосфері, зниження рівня освітленості або добових ефектів, інші можуть забезпечити отримання чіткого зображення.

У кожного діапазону хвиль та пов'язаної з ним технології реалізації датчика є свої переваги та недоліки. Так, довгоочікуваний довгохвильовий ІЧ-датчик (LWIR) споживає невелику кількість енергії, має непогані характеристики при виявленні цілей і добре працює в повній темряві. Однак ідентифікація цілей представляє певні труднощі, тому що одержувані зображення у цьому діапазоні хвиль мають недостатню детальність. Датчик короткохвильового ІЧ-діапазону

(SWIR 1...2,6 мкм) підходить для ідентифікації об'єктів і може добре бачити під час «теплого перерозподілу», коли сонце сходить і заходить і нагріває або охолоджує Землю. Однак його здатність до виявлення не настільки ефективна, як у LWIR, і він не працює у повній темряві.

Переваги:

- висока роздільна здатність;
- мала споживана потужність, компактні розміри та легка вага;
- низький вплив атмосферних завад у діапазоні 8...14 мкм;
- охолоджені ПЧ приймачі мають високу чутливість до контрасту та дозволяють виявляти об'єкти на великій відстані (понад 10 км).

Недоліки:

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

Телевізійні (ТВ) системи, що працюють за низьких рівнів освітленості. Зображення, одержуване за допомогою цих ТВ систем і що видається на індикатор на лобовому склі, в умовах однорідних температур та високої вологості значно краще, ніж у системи FLIR (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Телевізійна система огляду повітряного простору

Переваги:

- відсутність необхідності охолодження системи;
- відсутність проблем, пов'язаних з температурними перетинами;
- можливість накладання зображення польотних даних.

Недоліки:

- наявність ефекту розпливання зображення;
- суттєві обмеження по освітленості;
- наявність властивості непрямого бачення, що призводить до необхідності відображення зображень на спеціальному індикаторі.

Лазерні локатори. Принцип роботи лазерного локатора аналогічний принципу роботи звичайної активної РЛС і полягає у вимірі поля зору об'єктива відстані до кожної точки простору і кутового напрямку на ціль. Однак на відміну від звичайної РЛС, лазерний локатор має більш високу роздільну здатність, оскільки довжина робочої хвилі у нього значно менша. Це дозволяє здійснювати виявлення таких малорозмірних об'єктів, як дроти ліній електропередачі. Подібно до тепловізійних систем FLIR, лазерний локатор може працювати і за відсутності денного світла, проте на відміну від подібних систем, він може забезпечувати отримання тривимірного зображення. У лазерному локаторі шляхом виділення доплерівського усунення частоти імпульсних відбитих сигналів можна виявити рух об'єкта (рис. 2.10).

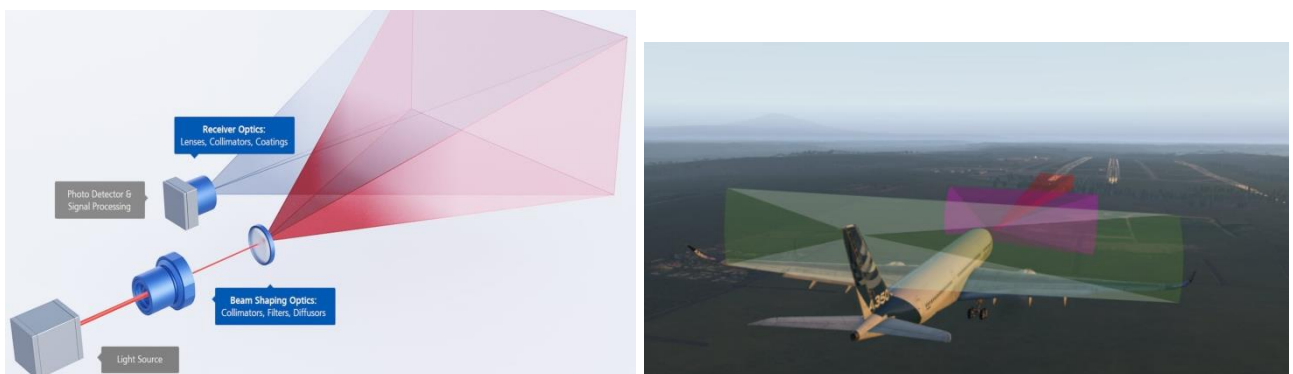


Рис. 2.10. Лазерний локатор LIDAR

Основним фактором, який 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, проте за наявності хмар або серпанків дальність дії в загальному випадку відповідає дальності дії тепловізійної системи FLIR. При звичайній тактичній обстановці при скануванні земної поверхні на відстані 3...5 км попереду літака як лазерний локатор, так і система FLIR ефективні при знаходженні літака нижче за край хмар, якщо немає густого туману.

Ефективність роботи лазерного локатора та системи FLIR за наявності серпанку або легкого туману відрізняються тим, що зображення, що отримується за допомогою системи FLIR, втрачає чіткість поступово при погіршенні погодних умов, тоді як лазерний локатор забезпечує отримання чіткого висококонтрастного зображення, доки приймаються відображені лазерні сигнали. .

Явище послаблення сигналів в атмосфері має дуже важливий побічний ефект: внаслідок суттєвого послаблення сигналів зі збільшенням відстані та відсутності бічних пелюсток у лазерного променя функціонування лазерного локатора дуже складно виявити та створити йому перешкоди.

Переваги: надає візуальні зображення дрона та його (потенційного) корисного навантаження, може записувати зображення.

Недоліки: довга тривалість процесу виявлення цілей у тих випадках, коли огляду підлягає великий простір, і високі вимоги до точності супроводу об'єктів, що супроводжується. Пояснюється це надзвичайною вузькістю лазерного променя.

2.4.2. Радіолокаційні системи

Найважливішим базовим елементом інтегрованих комплексів моніторингу навколишнього простору є РЛС (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Антидронові радіолокатори

Особлива роль РЛС обумовлюється їхньою здатністю виявляти цілі на значно більших дальностях порівняно з ОЕС, а також виявляти цілі та отримувати радіолокаційне зображення (РЛЗ) поверхні Землі вдень і вночі у будь-яких погодних та метеорологічних умовах.

РЛС під час вирішення завдання моніторингу повітряного простору забезпечують:

- пошук, виявлення та впізнання (разом із системою державного впізнання) повітряних об'єктів (цілей);
- роздільну здатність, вимірювання координат та параметрів руху виявлених повітряних цілей у різних режимах функціонування;
- розпізнавання типів та класів повітряних цілей.

Існуючі імпульсно-доплерівські РЛС здійснюють ефективне виявлення повітряних цілей як на тлі відбиття від поверхні Землі, так і у вільному просторі з одночасним виміром дальності, кутових координат цілі та радіальної швидкості її руху. В даний час у РЛС знаходять застосування такі режими випромінювання імпульсних сигналів: з високою (ВЧП), середньою (СЧП) та низькою (НЧП) частотами повторення імпульсів.

Переваги: велика дальність, постійне відстеження, високоточна локалізація, може обробляти сотні цілей одночасно, може відстежувати всі дрони незалежно від автономного польоту, незалежно від умов зору (день, ніч, туман тощо)

Недоліки: Діапазон виявлення залежить від розміру дрона. Більшість не відрізняє птахів від дронів. Потрібна ліцензія на передачу та перевірка частоти для запобігання перешкодам.

Виробники: Spotter Global, Robin Radar Systems, FLIR.

2.4.3. Акустичні датчики (рис. 2.12) виділяють необхідну звукову інформацію на тлі навколишнього шуму. Зазвичай це мікрофон або мікрофонна матриця (багато мікрофонів), які виявляють звук дрона та обчислюють напрямок. Для грубої тріангуляції можна використовувати більше наборів мікрофонних масивів.

Переваги: виявляє всі безпілотники в межах ближнього поля, включно з автономними (без радіочастотного випромінювання). виявляє безпілотні літальні апарати на землі, де інші технології можуть мати проблеми. великий розрив. -заповнювач у зонах поза зоною прямої видимості інших датчиків. Дуже мобільний і швидко розгортається. Повністю пасивний.

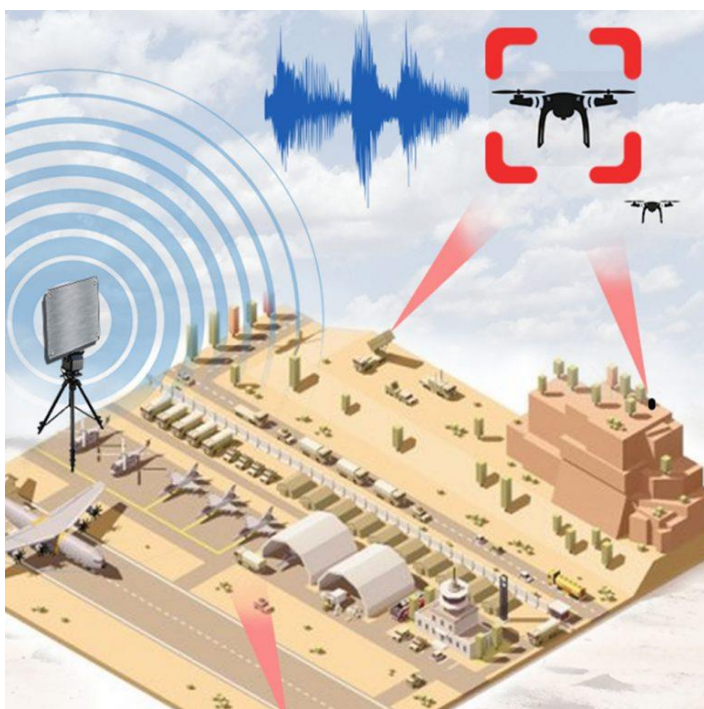


Рис. 2.12 Акустичні датчики.

Недоліки: Погано працює в шумному середовищі, дуже малий радіус дії (макс. 300-500 м)

Виробники: Squarehead Technologies.

2.4.4. Аналізатори радіочастот (РЧ).

Радіочастотні аналізатори складаються з однієї або кількох антен для прийому радіохвиль і процесора для аналізу радіочастотного спектру. Вони використовуються, щоб спробувати виявити радіозв'язок між дроном і його контролером.



Рис. 2.13. Система виявлення дронів Aragonia та секція антени IsoLOG

Деякі системи можуть ідентифікувати найпоширеніші марки та моделі дронів, тоді як інші можуть навіть ідентифікувати MAC-адреси дрона та контролера (якщо дрон використовує Wi-Fi для зв'язку). Це особливо корисно для доказу того, що конкретний дрон і контролер були активними.

Деякі висококласні системи також можуть триангулювати дрон і його контролер, якщо використовують кілька радіоблоків, розташованих далеко один від одного.

Переваги: низька вартість. Може виявляти (іноді ідентифікувати) кілька дронів і контролерів. Він пасивний. Деякі можуть триангулювати положення дрона та контролера.

Мінуси: не завжди знаходить і відстежує дрони. Не може виявити автономні безпілотники, менш ефективний у багатолюдних радіочастотних зонах, як правило, малого радіусу дії. Важко виявити дрони, керовані через мережі 5G.

Успішна радіочастотна ідентифікація також залежить від бібліотек, які потребують постійного зворотного проектування та оновлення. Зворотне проектування та оновлення потребують часу, протягом якого UAS із зміненими

протоколами залишаються непоміченими. Підписка на оновлення бібліотеки може коштувати дорого.

Виробники: Rohde & Шварц, Aaronia, Dedrone та CERBAIR.

Таким чином, аналіз інформаційних датчиків, що забезпечують отримання інформації про навколишній простір для моніторингу БПЛА призвів до наступних висновків:

- телевізійні датчики виявляють об'єкт на основі різниці яскравості між ним і навколишнім середовищем, тому мають низьку роздільну здатність на великих відстанях і не працюють в умовах поганої видимості;
- радіолокаційні та лазерні локатори є активними системами, які потребують підвищеного енергоспоживання та додаткового розташування передавальних і приймальних антен та лінз;
- акустичні датчики мають низьку вибірковість та завадостійкість;
- інфрачервоні датчики виявляють об'єкти, які мають тепловий контраст на фоні навколишнього середовища і можуть виявляти нагріті частини літальних апаратів на фоні повітряного простору, температура якого зменшується з висотою.

Тому для моніторингу повітряного простору на виявлення БПЛА найбільш доцільно використовувати інтегровані комплекси моніторингу навколишнього простору на основі радіолокаційних та пасивних інфрачервоних датчиків, що дасть змогу виявляти БПЛА будь яких типів і розмірів на відстанях достатніх для їх нейтралізації або знищення.

На сьогоднішній день досить багато описано радіолокаційних та інших радіотехнічних (аналізatori радіочастот) засобів виявлення БПЛА, однак виявлення малорозмірних БПЛА в автономному польоті (при відсутності радіозв'язку із контролером) на малих висотах зменшує імовірність виявлення у кілька разів. Провідні виробники систем виявлення та захисту від дронів також дійшли висновку застосування сукупності різнотипних датчиків, найбільш поширеними з яких є інфрачервоні пасивні системи.

Отже на поточний час сукупність активних радіолокаційних та пасивних оптоелектронних систем є найбільш ефективною інтегрованою системою

виявлення БПЛА. Тому проведемо дослідження можливості виявлення БПЛА різних типів (літакового та коптерного) та вагових груп інфрачервоною пасивною системою моніторингу повітряного простору.

РОЗДІЛ 3

ІНФРАЧЕРВОНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

3.1. Характеристика інфрачервоного випромінювання повітряних об'єктів

Рух будь-якого сучасного БПЛА неможливий без використання двигуна, який є тепловою або електричною машиною і тому випромінює інфрачервоні (ІЧ) хвилі, окрім двигунів, ІЧ-хвилі також випромінюються нагрітими частинами фюзеляжу або корпусу БПЛА, тому проведемо дослідження можливості та умов виявлення БПЛА різних типів пасивними інфрачервоними датчиками.

Основними перевагами інфрачервоних датчиків є можливість пасивного виявлення інших повітряних об'єктів на відстані до 50 км (для об'єктів великих розмірів з турбореактивними двигунами) за їх інфрачервоним випромінюванням від працюючих двигунів та нагрітих елементів фюзеляжу, що дозволяє визначити кут пеленгу та кут місця повітряного об'єкта, а також, на основі зміни потужності теплового випромінювання, дає можливість визначити напрямок його руху. Крім того, на основі аналізу інтенсивності та спектру інфрачервоного випромінювання можна визначити тип двигуна підвітряного об'єкта. Наприклад одноконтурний турбореактивний двигун (ТРД) забезпечує температуру струменя 500-700°C, такі двигуни можна виявити на дальності 30-50 км. Температура струменя двоконтурного турбовентиляторного двигуна (ТВРДД) на 25% нижча, ніж у турбореактивного, через проходження холодного повітря через зовнішній контур двигуна.

https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/kulinchenko_teploper/28.htm

Із збільшенням температури об'єкта характеристики ІЧ випромінювання змінюються за наступним правилом (рис. 3.1):

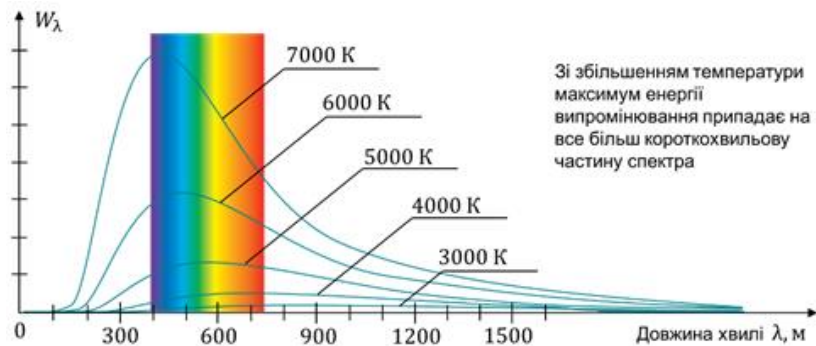


Рис. 3.1. Залежність інтенсивності ІЧ випромінювання від довжини хвилі та температури.

Довжина хвилі, що відповідає максимальній енергії випромінювання – зменшується, а повна енергія випромінювання збільшується в четвертій степені від температури об'єкта (Закони законом Стефана-Больцмана та Голіцина-Віна).

Таким чином, найбільш доцільно застосовувати в ІЧ датчиках систем попередження зіткнення діапазон хвиль 4-6 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 випромінювань в інфрачервоному діапазоні необхідно враховувати теплопровідність матеріалів об'єктів спостереження. Нагріваючись від сонячних променів, вони до відбитого світла додають частку власних випромінювань. 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.

3.2. Основні закони ІЧ випромінювання

Теплове випромінювання- це результат перетворення внутрішньої енергії тіл в енергію електромагнітних коливань. При попаданні теплових променів (хвиль) на інше тіло, їх енергія частково поглинається ним, перетворюючись знову в внутрішню. Так відбувається променевий теплообмін між тілами. Теплообмін випромінюванням відбувається безупинно між тілами, довільно розташованими в просторі. Теплове випромінювання властиво всім тілам: твердим, рідким і газоподібним.

Теплове випромінювання як процес поширення електромагнітних хвиль характеризується довжиною хвилі λ та частотою коливань $\nu=c/\lambda$, де c – швидкість світла у вакуумі. Спектр випромінювання більшості твердих і рідких тіл неперервний. Ці тіла випускають промені, що різняться між собою довжиною хвилі λ , а отже, і своїми властивостями.

Розрізняють наступні види випромінювання: космічне, γ -випромінювання, рентгенівське, ультрафіолетове, видиме, інфрачервоне й радіовипромінювання. У теплотехніку найбільший інтерес представляє теплове випромінювання при $\lambda = 0,8 - 80$ мкм. При температурах випромінюючого тіла до 1500°C таке випромінювання в основному інфрачервоне й частково видиме ($\lambda = 0,4 - 0,8$ мкм). Отже: тіла, нагріті до високої температури, набувають здатності світитися. Наприклад, розпечені тверді тіла випромінюють біле світло, яке має суцільний спектр частот. Із зниженням температури тіла зменшується інтенсивність його випромінювання, а у спектрі переважають довгі хвилі (червоні та інфрачервоні). При подальшому охолодженні тіло випромінює невидимі оком інфрачервоні промені.

Свічення тіл, зумовлене нагріванням, називається тепловим (температурним) випромінюванням.

Теплове випромінювання є найпоширенішим у природі. Воно здійснюється за рахунок енергії теплового руху атомів і молекул речовини, тобто за рахунок внутрішньої енергії і тому залежить від температури речовини.

Оточимо випромінююче тіло оболонкою з ідеально відбивальною поверхнею. Повітря з оболонки відкачаємо. Відбите оболонкою випромінювання, потрапляючи на тіло, поглинається ним (частково або повністю). Буде відбуватися неперервний обмін енергією між тілом і випромінюванням, яке заповнює оболонку.

Якщо обмін енергії між тілом і випромінюванням залишається незмінним при кожній довжині хвилі, стан системи тіло – випромінювання буде рівноважним.

Дослід показує, що єдиним видом випромінювання, яке може знаходитися в рівновазі з випромінюючими тілами, є теплове випромінювання.

Здатність теплового випромінювання знаходиться в рівновазі з випромінюючими тілами зумовлена тим, що його інтенсивність зростає при підвищенні температури. Порушення рівноваги в системі тіло – випромінювання викликає виникнення процесів, що відновлюють рівновагу.

Рівноважне випромінювання однорідне і неполяризоване, напрямки його поширення у порожнині рівноймовірні. Будь-яке випромінювання характеризується об'ємною густиною та спектральною густиною енергії випромінювання.

Об'ємна густина w енергії випромінювання дорівнює сумарній енергії одиниці об'єму електромагнітних хвиль усіх можливих частот ($0 \leq \nu \leq \infty$). А спектральна густина енергії випромінювання дорівнює енергії одиниці об'єму електромагнітних хвиль вузького інтервалу частот ν , $\nu + \Delta\nu$ або інтервалу довжин хвиль λ , $\lambda + \Delta\lambda$.

Тіло, яке здатне поглинати повністю при будь-якій температурі всю енергію електромагнітних хвиль, які падають на нього, незалежно від їх частоти, називається абсолютно чорним.

Закон Кірхгофа: відношення випромінювальної здатності тіла до його поглинальної здатності не залежить від матеріалу тіла; воно є для всіх тіл

універсальною функцією частоти ν і температури T . Інакше кажучи, **чим більше енергії поглинає тіло, тим більше воно її випромінює.**

1. Інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла залежно від температури і частоти визначається **законом Планка**:

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

де $I(\nu)$ – потужність випромінювання на одиницю площі поверхні випромінювання в одиницю тілесного кута в діапазоні частот $\nu, \nu + \Delta\nu$.

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 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.

2. Загальна енергія теплового випромінювання визначається **законом Стефана-Больцмана**:

$$W = \sigma T^4$$

де W – потужність на одиницю площі поверхні випромінювання,
 $\sigma \approx 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – сталий коефіцієнт Стефана-Больцмана.

3. Довжина хвилі, при якій енергія випромінювання максимальна, визначається **законом зсуву Віна**:

$$\lambda_{\text{max}} = 0,002898/T$$

де T – температура (в кельвінах),
 λ_{max} – довжина хвилі з максмальною інтенсивністю (в метрах),
0,002898 - називають сталою Віна (м·К).

На практиці часто це рівняння називають законом Голіцина-Віна, він вказує на те, що із збільшенням температури випромінювача максимум випромінення зсувається вліво по спектру довжин хвиль λ (рис. 3.2).

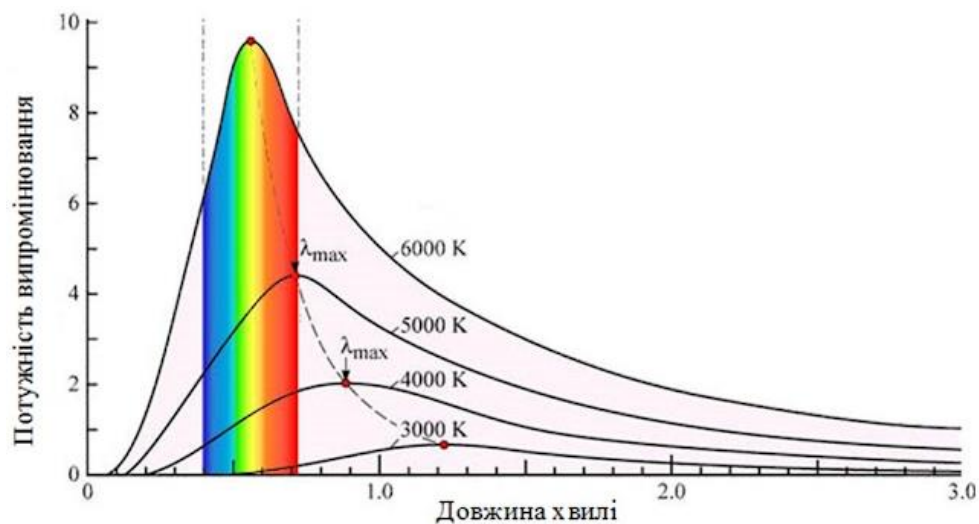


Рис. 3.2. Закон зсуву Голіціна-Віна

3.3. Інфрачервоне випромінювання силових установок

Поршневі двигуни. Основними джерелами випромінювання повітряних об'єктів із поршневими двигунами є вихлопні патрубкі, відпрацьовані гази двигуна, що виходять з патрубків, і корпус двигуна. Потужність їх випромінювання визначається температурою, розмірами, коефіцієнтом випромінювання і повнотою згоряння палива. Індикатриса випромінювання визначається також ступенем екранування тепловипромінюваних поверхонь і обсягів іншими деталями повітряного об'єкта.

Корпуси двигунів (за наявності) мають порівняно низьку температуру (90...100°C) і малий коефіцієнт випромінювання (0,2...0,4), тому енергія, випромінювання ними, відносно низька.

Вихлопні гази поршневих двигунів містять велику кількість дрібних твердих частинок вуглецю, нагрітих до температури 800...1100°C. Наявність їх обумовлена неповним згорянням вуглеводневих палив в двигунах внутрішнього згоряння, 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. Пікові температури вихлопних газів, навіть якщо присутні лише короткочасно, можуть досягати рівнів, що перевищують 2200°C.

Температури вихлопних газів коливаються у межах від 600 до 850°C для дизельних двигунів і від 800 до 1050°C для бензинових двигунів.

У загальному балансі енергії випромінювання повітряного об'єкта з поршневим двигуном частка випромінювання корпусів і вихлопних газів коливається від 35 до 45%. Інша частина припадає на випромінювання вихлопних патрубків, температура яких сягає 650...800°C поблизу випускного колектора, знижуючись по зрізу, до 250...350°C. Вихлопні патрубки двигунів розташовуються під центропланом 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. 3.3 представлено поршковий двигун іранського БПЛА Mohajer-6, а на рис 3.4 термографія працюючого поршневого двигуна літака Piper PA-31.

На рис. 3.5 зображені індикатриси випромінювання літака з двома поршковими двигунами Piper PA-31. Наявність максимумів в наведених кривих (сила IR 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.

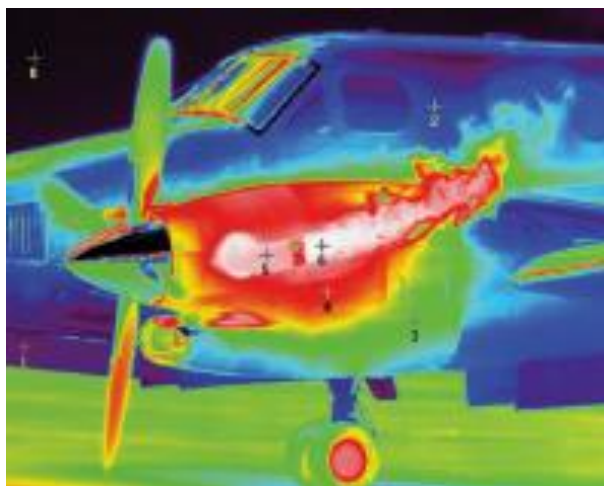
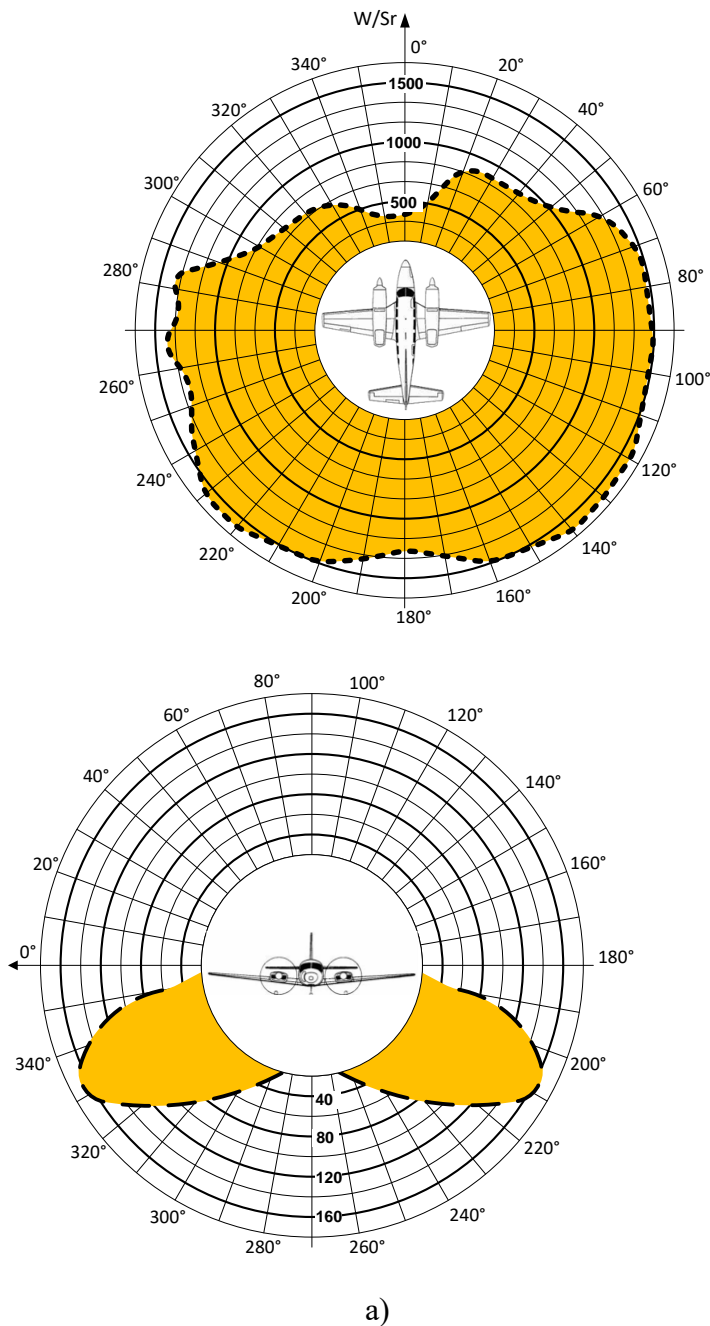


Рис. 3.3. Поршневий двигун БПЛА Mohajer-6

Рис. 3.4. Термографія двигуна Pipec



а) б)
 Рис. 3.5. Індикатриса випромінювання літака Piper PA-31
 в горизонтальній (а) та вертикальній (б) площинах

Турбореактивні двигуни. Головними джерелами випромінювання об'єктів із турбореактивними двигунами (ТРД) на дозвукових швидкостях польоту є деталі двигуна, нагріті до високої температури і струмів вихлопних газів, названий факелом.

Розглянемо випромінювання турбореактивного двигуна (рис. 3.6). Повітря через дифузор і компресор надходить у камеру згоряння двигуна (ступінь стиснення 10 ... 15), де змішується з паливом і згоряє при майже

постійному тиску. Відпрацьовані гази проходить через турбіну, віддаючи їй енергію, достатню для приводу компресора; при цьому ступінь стиснення зменшується до 2, а температура знижується приблизно на 150°C . Гази проходять подовжувальну трубу і виходять через сопло в навколишній простір у вигляді струменя, що володіє високою швидкістю. Подовжувальна труба має циліндричну форму з співвідношення довжини та діаметру близько 1,6...4. Її можна розглядати як модель абсолютно чорного тіла з температурою стінок, рівною приблизно температурі газів на виході турбіни (ТВГ).

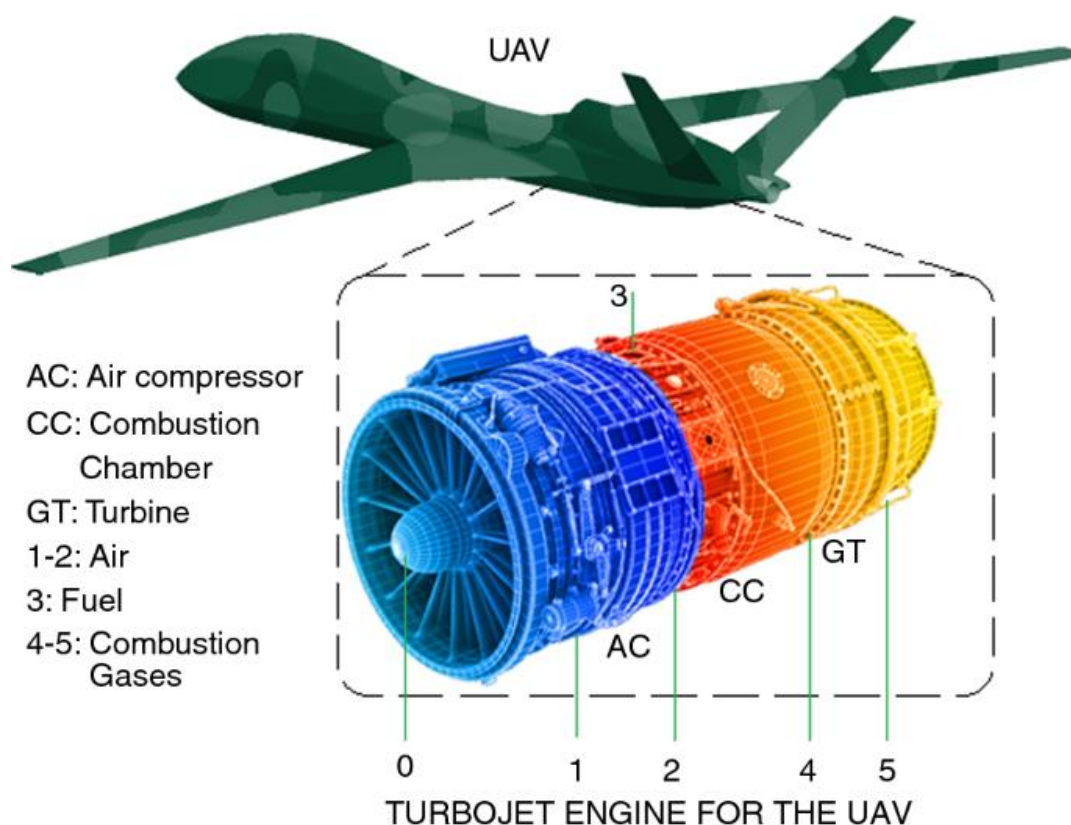


Рис. 3.6. Випромінювання турбореактивного двигуна БПЛА.

В сучасних турбореактивних двигунах ТВГ в короткі проміжки часу може досягати 1000 K ; при тривалому польоті її підтримують не більше $800\text{...}900\text{ K}$, а при польоті з малою швидкістю - $500\text{...}700\text{ K}$. Газовий потік, нагрітий до цієї температури, омиває деталі двигуна. Найвищу температуру мають лопатки газової турбіни, так як вони додатково нагріваються за рахунок аеродинамічного потоку при його зустрічі з лопатками під деякими кутами, близькими до 90° . При тривалій роботі двигуна температура поверхні лопаток близька до ТВГ. Таку ж приблизно температуру має реактивний конус.

В інженерних розрахунках турбореактивний двигун літака можна розглядати як сіре тіло з коефіцієнтом випромінювання 0,9; температурою, що дорівнює ТВГ; і площею, яка дорівнює площі сопла. Таке припущення компенсує малі значення відношення довжини подовжувальної труби до її діаметру і невелику різницю між ТВГ і дійсної температурою стінок.

На відміну від поршневих двигунів у турбореактивних двигунів питома вага потужності випромінювання газового факела мала внаслідок повного згоряння палива при надлишку кисню і відсутності в газовому струмені розпечених частинок вуглецю.

Головними продуктами згоряння в факелі є вуглекислота і пари води.

Сильна смуга випромінювання спостерігається на довжині хвилі 4,3 мкм, а слабша, але більш широка смуга - на 2,7 мкм. Ця смуга утворюється в результаті накладення декількох смуг випромінювання парів H_2O і CO_2 . Велика кількість слабких смуг є і в дальній інфрачервоній області ($\lambda > 25$ мкм). При згорянні деяких палив утворюється хлористий водень, що дає серію смуг в районі $\lambda = 3,5$ мкм. З точки зору виявлення, спектральна смуга в районі 4,3 мкм більш вигідна, ніж смуга 2,7 мкм, так як відношення їх спектральних енергетичних яскравостей лежить в межах 2.6 ... 10, в залежності від виду палива.

Температура газу на виході сопла

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\nu-1}{\nu}}$$

де T_2 - температура газу в подовжувальній трубі (близька до ТВГ); P_2 - тиск газу після розширення його на виході сопла; P_1 - тиск газу в подовжувальній трубі; ν - показник адіабати (для продуктів згоряння $\nu = 1,3$).

Відношення P_2/P_1 для сучасних двигунів при дозвукових швидкостях польоту дорівнює приблизно 0,5. Якщо розширення газу відбувається до навколишнього тиску, то $T_2 \approx 0,85 T_1$, тобто температура факела турбореактивного двигуна на виході сопла приблизно на 15% нижче ТВГ.

Температура факела швидко зменшується в міру віддалення від зрізу сопла і від осової лінії (рис. 3.7, 3.8). Так, наприклад, при віддаленні від зрізу

сопла на відстань 4 м і від осі на 0,25 м температура факела знижується з 900 до 500 К.

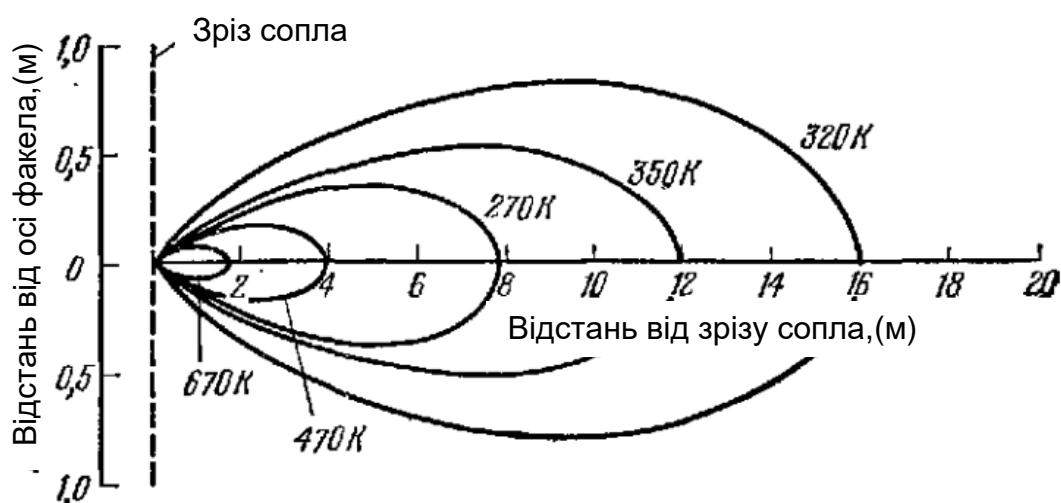


Рис. 3.7. Ізотерма факела турбореактивного двигуна тягою 3000 Н.

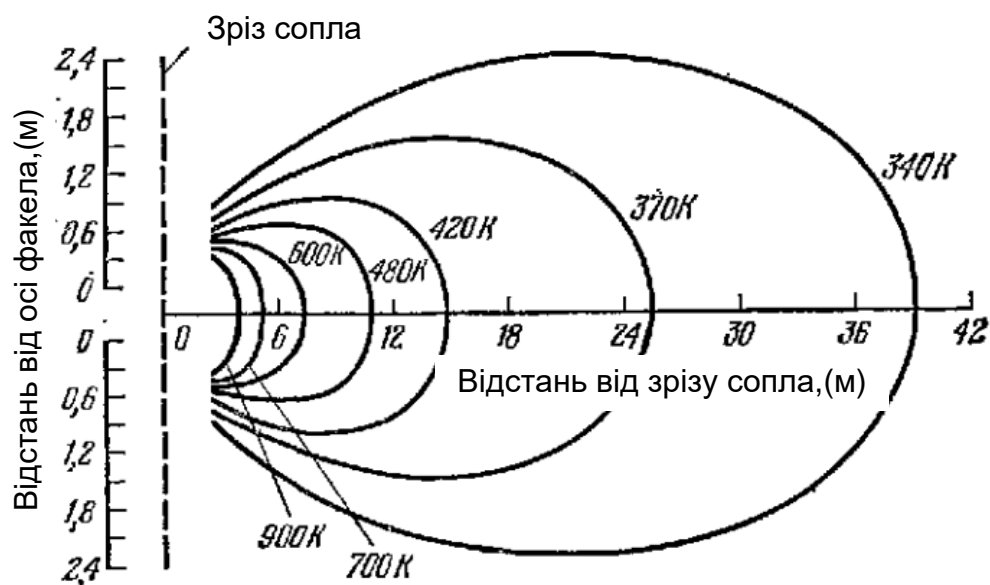


Рис. 3.8. Ізотерма факела турбореактивного двигуна тягою 5000 Н.

Енергетична яскравість факела залежить від кількості і температури молекул газу, які визначаються витратою палива в двигуні. Наприклад, якщо на висоті 500 м при швидкості, відповідно $M = 0,4$, витрата палива становить 6000 кг/год, а на висоті 10000 м при швидкості $M = 0,8$ витрата палива 3000 кг/год, то в першому випадку енергетична яскравість факела приблизно вдвічі більше, ніж у другому.

При роботі двигуна в форсажному режимі витрата палива сильно збільшується (в деяких випадках в п'ять разів). Одночасно збільшуються

геометричні розміри факела, що можна проілюструвати рис. 3.9, де зображені ізотерми факела турбореактивного двигуна на максимальній тязі на рівні моря без форсажу і в форсажному режимі.

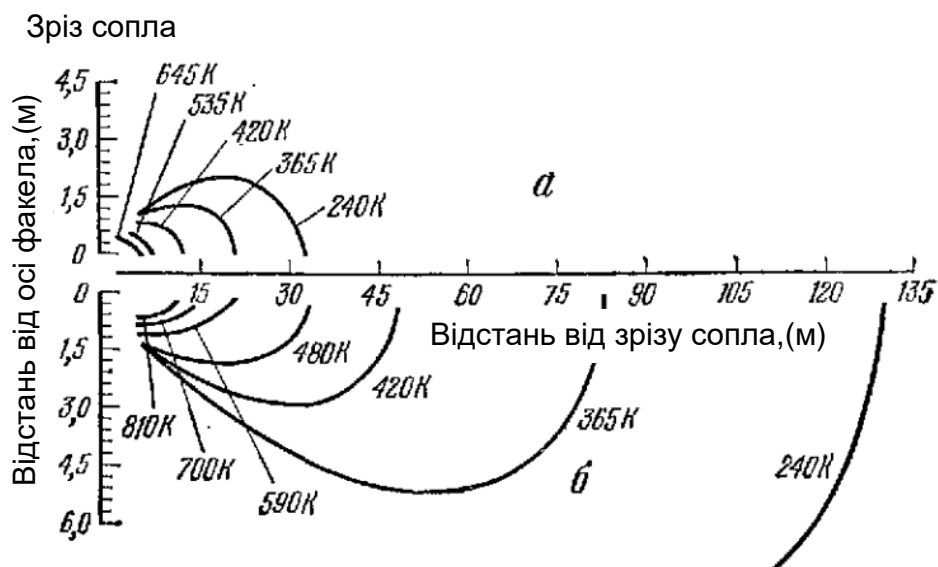


Рис. 3.9. Ізотерма факелу турбореактивного двигуна: на максимальній тязі (а) та на форсажному режимі (б).

Для дозвукового польоту справедливий вираз $T_2 \approx 0,85T_1$, так як температура газів, що залишають форсажну камеру, але знаходяться ще в подовжувальній трубі, дорівнює 2100 К, то температура газів на зрізі сопла $T_2 \approx 0,85 \cdot 2100 = 1785$ К. Перехід на режим форсажу призводить до значного збільшення яскравості факела. На великих відстанях від приймального пристрою енергетична сила світла всього факела може виявитися в кілька разів більше енергетичної сили світла подовжувальної труби.

При високих надзвукових швидкостях польоту літака випромінювання факела ТРД, що працює на форсажі, мале у порівнянні з випромінюванням нагрітої подовжувальної труби.

Розрахунок енергетичної сили світла факела ТРД представляє відомі труднощі, оскільки в різних ділянках факела змінюється як температура, так і коефіцієнт випромінювання. Наближено вважають, що в діапазоні 3,2...4,8 мкм енергетична сила світла факела становить приблизно 10% енергетичної сили світла сопла. При спостереженні ззаду літака, що летить на дозвуковій швидкості, випромінюванням факела нехтують. При спостереженні з таких

напряжків, з яких зріз сопла було видно, наприклад з передньої півсфери, факел двигуна може виявитися єдиним джерелом випромінювання літака.

3.4. Вплив атмосфери 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). Смути 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 озоном, 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 тепlopеленгаторів 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. 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.

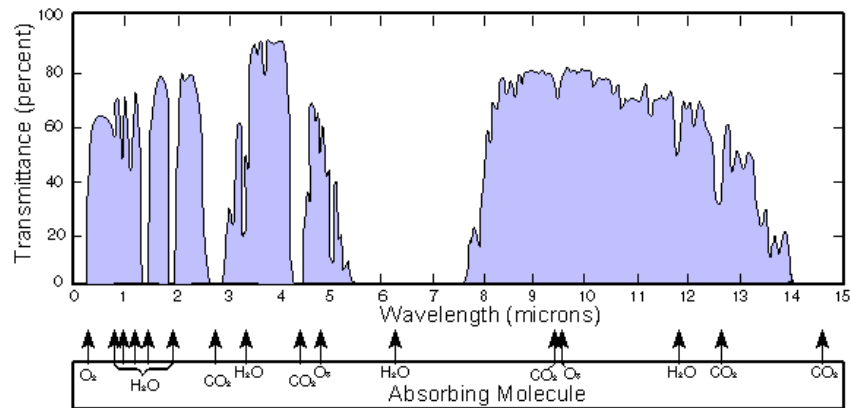


Рис. 3.10. Графік залежності коефіцієнта пропускання атмосфери τ_a від довжини хвилі випромінювання, як уже зазначалося, не тільки поглинається молекулами води, вуглекислого газу та озону, а й розсіюється молекулами повітря (молекулярне розсіювання) і різними частинками, присутніми в атмосфері: кристалами 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 замутненість 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 знижених дальностях.

При аналізі ефективності дії тепловізійних пристроїв в різних умовах вводять коефіцієнт використання випромінювання K , який враховує спектральний склад випромінювання об'єкта, що спостерігається, спектральні характеристики приймача випромінювання тепlopеленгатора і функцію пропускання випромінювання шаром атмосфери між тепlopеленгатором і об'єктом. Цей коефіцієнт складає:

$$K = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(M_{e\lambda} / (M_{e\lambda})_{max} \right) S_{\lambda} \tau_a d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(M_{e\lambda} / (M_{e\lambda})_{max} \right) d\lambda}$$

де $M_{e\lambda} / (M_{e\lambda})_{max}$ - функція відносної спектральної щільності енергетичної освітленості спостережуваного об'єкта, що залежить від довжини хвилі; S_{λ} - спектральна характеристика приймача випромінювання (ПВ) тепловізора з урахуванням спектральних характеристик оптичного фільтра і об'єктива; τ_a - коефіцієнт пропускання атмосфери в діапазоні довжин хвиль $\lambda_1 \dots \lambda_2$ чутливості приймача випромінювання.

Найбільшу складність при розрахунку коефіцієнта K за допомогою ЕОМ є визначення функції $\tau_a = \tau_a(\lambda)$, яка залежить від великого числа параметрів, і, як видно з рис. 1.10, є переривчастою. Однак завдання може бути спрощена, якщо розраховувати коефіцієнт використання K не для всього інфрачервоного діапазону спектра, а для певних спектральних інтервалів, відповідних атмосферних вікнам, які зазвичай збігаються із спектральними діапазонами чутливості приймачів випромінювання тепlopеленгатора.

Обробка результатів розрахунку коефіцієнта K при широкому варіюванні вхідних параметрів (висота $H = 0 \dots 20$ км, дальність $D = 1 \dots 20$ км, температура повітря біля поверхні землі $t_B = -20 \dots +20$ °С, вологість повітря $f = 60 \dots 90$ %, дальність метеорологічної видимості $d_B = 10 \dots 30$ км, температура об'єкта спостереження $T = 400 \dots 1100$ К) дозволила апроксимувати цей коефіцієнт

наближеними залежностями. Обробка проводилася за допомогою алгоритмів, що реалізують метод групового обліку аргументів. Спектральні характеристики ПВ бралися відповідно до рис. 3.11, 3.12.

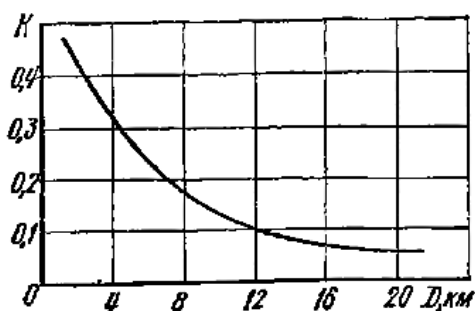
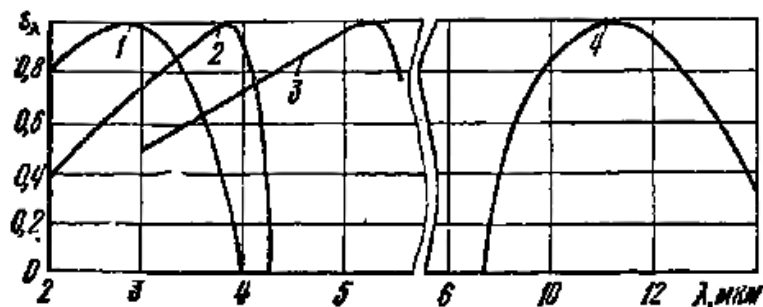


Рис. 3.11. Спектральна характеристика ПВ: 1 – PbS (77К); 2 – PbSe (295К); 3 – InSb (77К); 4 – Hg:CdTe (77К).

Рис. 3.12. Графік залежності коефіцієнта К від дальності D.

3.5. Розрахунок дальності виявлення високотемпературних об'єктів

Проведемо розрахунок дальність дії **IRST** (теплопеленгатора, ТП) при ймовірності виявлення повітряного об'єкта $p_{\text{вияв}} = 0,8$ якщо відношення напруги сигналу до середньої квадратичної напруги шуму та коефіцієнт пропускання атмосфери дорівнюють одиниці.

Основні характеристики теплопеленгатора: кут зору ТП $\gamma = 0,378$ ср (плоский кут $\vartheta = 40^\circ$); миттєвий кут зору $\gamma_{\text{мит}} = 6 \cdot 10^{-5}$ ср (плоский кут $\vartheta_{\text{мит}} = 0,5^\circ$); період огляду поля зору $T_{\text{огл}} = 1$ с; число елементів поля огляду $\beta = \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{\text{мгн}}}\right)^2 = \left(\frac{40}{0,5}\right)^2 = 6,4 \cdot 10^3$; коефіцієнт $\psi = 0,5$; час перегляду миттєвого поля зору $t_{\text{мит}} = \frac{T_{\text{огл}}}{\beta} \approx 1,6 \cdot 10^{-4}$ с; ймовірність відсутності помилкового сигналу $p_{\text{л.с}} = 0,7$; діаметр об'єктива $D_{\text{об}} = 30$ см; коефіцієнт пропускання оптичної системи $\tau_{\text{оп}} = 0,6$; приймач випромінювання - фоторезистор на основі InSb, межі

чутливості $\lambda_1 = 2\text{мкм}$, $\lambda_2 = 6\text{мкм}$, порогова чутливість $F_{\text{пор}} = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{Вт} / (\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2})$; об'єкт спостереження: $S = 0,5\text{м}^2$; $t = 327^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 0,9$.

1. Визначаємо довжину хвилі, відповідну максимуму спектральної щільності променистого потоку, випромінюваного об'єктом:

$$\lambda_{\text{м}} = \frac{2898}{T} = \frac{2898}{273+327} \approx 4,8 \text{ мкм}.$$

2. Розраховуємо приведену силу випромінювання об'єкта, тобто силу випромінювання з урахуванням спектральної характеристики чутливості приймача випромінювання:

$$I_{\Delta\lambda} = \frac{F_{\Delta\lambda}}{\pi} = \frac{S}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_{\lambda,T} S_{\lambda} d\lambda = \frac{S\varepsilon\sigma T^4}{\pi} K \left[z\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_{\text{м}}}\right) - z\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_{\text{м}}}\right) \right].$$

Величину K знаходимо графоаналітичним методом (рис. 3.13):

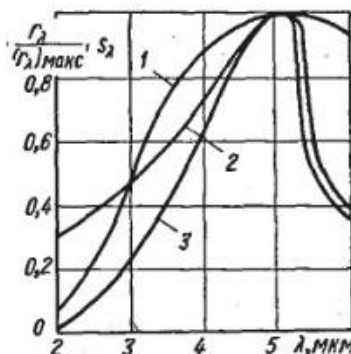


Рис. 3.13. Розрахунок коефіцієнта використання випромінювання:

де 1 - $\frac{r_{\lambda,T}}{(r_{\lambda,T})_{\text{макс}}}$; 2 - S_{λ} ; 3 - $\frac{S_{\lambda} r_{\lambda,T}}{(r_{\lambda,T})_{\text{макс}}}$.

Звідси визначаємо: $K = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\frac{r_{\lambda,T}}{(r_{\lambda,T})_{\text{макс}}} S_{\lambda} d\lambda \right]}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\frac{r_{\lambda,T}}{(r_{\lambda,T})_{\text{макс}}} d\lambda \right]} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \approx 0,7$;

$$\lambda_2 / \lambda_{\text{м}} = 6 / 4,8 = 1,03; z(1,25) = 0,27;$$

$$\lambda_1 / \lambda_{\text{м}} = 2 / 4,8 = 0,34; z(0,41) < 0,01;$$

$$I_{\Delta\lambda} = \frac{1}{\pi} 0,5 \cdot 10^4 \cdot 0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot 500^4 \cdot 0,27 \cdot 0,7 \approx 80 \text{ Вт/см}.$$

3. Знаходимо граничну дальність тепlopеленгатора в припущенні, що шум визначається власним шумом приймача випромінювання:

$$L_0 = \left(\frac{I_{\Delta\lambda} \pi n \sin \vartheta D_{\text{об}} \tau_{\text{оп}}}{2F_{\text{пор}}} \right)^{1/2} \left(\frac{\psi \beta}{\dot{\vartheta}} \right)^{1/4} = \sqrt{\frac{80 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 0,64 \cdot 30 \cdot 0,6}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-10}}} \sqrt{\frac{0,5 \cdot 80^2}{40/57,2}} = 7,85 \cdot 10^6 \text{ см}$$

або $L_0 = 78,5 \text{ км}$.

4. Визначаємо ймовірність виявлення об'єкта p_{Σ} на дальності $L_0 = 78,5 \text{ км}$; для цього знаходимо спочатку ймовірність того, що за час перегляду одного елемента напруга шуму перевищить задане значення $U^*/\bar{U}_{\text{ш}}$:

$$p = \frac{1}{\beta} \frac{1}{p_{\text{л.с}}} = \frac{1}{6,4 \cdot 10^3} \ln \frac{1}{0,7} = 5,7 \cdot 10^{-5};$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{U^*/\bar{U}_{\text{ш}}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,5 - p \approx 0,4999.$$

За табл. значень інтегралу імовірності знаходимо $p = 0,4999^{U^*/\bar{U}_{\text{ш}}} =$

3,68. Для дальності $L = L_0 \left(\frac{U_c}{\bar{U}_{\text{ш}}} = 1 \right)$ отримуємо

$$p_{\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{U^*/\bar{U}_{\text{ш}} - U_c/\bar{U}_{\text{ш}}}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{3,68-1}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,5 - 0,4693 = 0,0037 (0,37\%).$$

5. Розраховуємо дальність дії тепlopеленгатора при ймовірності виявлення об'єкта $p_{\text{обн}} = 0,8$: $0,8 = 0,5 - x$; $x = -0,3$. За табл. Знаходимо

$$\frac{U^*}{\bar{U}_{\text{ш}}} - \frac{U_c}{\bar{U}_{\text{ш}}} = -0,84.$$

Так як $\frac{U^*}{\bar{U}_{\text{ш}}} = 3,68$, то $\frac{U_c}{\bar{U}_{\text{ш}}} = 3,68 + 0,84 = 4,52$.

З огляду на те, що $\left(\frac{L_0}{L} \right)^2 = \frac{U_c/\bar{U}_{\text{ш}}}{(U_c/\bar{U}_{\text{ш}})_0}$, $L = L_0 \sqrt{1/4,52} \approx 0,47 L_0$.

Наведемо наближену формулу для розрахунку максимальної дальності дії скануючих тепlopеленгаторів з багатоелементними приймачами випромінювання

$$L_{\text{макс}} = \sqrt{0,31 \tau_{\text{оп}} D_{\text{об}} \frac{I_{\Delta\lambda}}{m F_{\text{пор}} \vartheta_{\text{МГН}}} \sqrt{\frac{T_{\text{МГН}}}{\xi}}},$$

де ξ – число чутливих елементів приймача. Так, при $\tau_{оп} = 0,6$; $D_{об} = 30$ см; $I_{\Delta\lambda} = 80$ Вт/ср; $F_{пор} = 0,5 \cdot 10^{-10}$ Вт/(см · Гц^{1/2}); $m = 4$; $\vartheta_{МГН} = 8,73 \cdot 10^{-8}$ рад; $T_{МГН} = 0,05$ с і $\xi = 12$ отримуємо $L_{макс} = 43,5 \cdot 10^5$ см (або ≈ 45 км).

В роботі приведена номограма для розрахунку максимальної дальності дії скануючих ПЧ-приладів (рис 3.14), в основу якої покладена наступна розрахункова формула:

$$L_{макс} = \sqrt{\int_0^{\infty} \frac{I_{\lambda} \tau_a \tau_{оп} d\lambda}{F_{пор}} \frac{D_{об} \xi T_{обз}}{f_{об} \gamma t_{п}}}$$

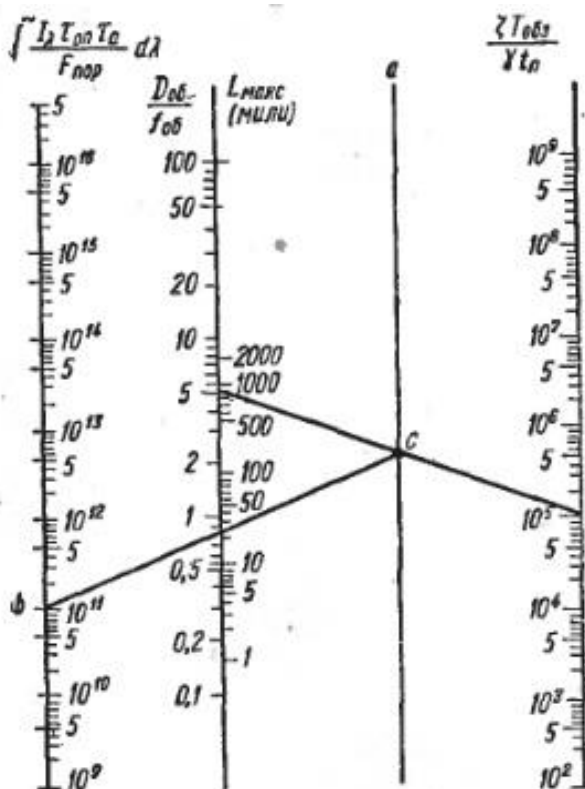


Рис. 3.14. Номограма для розрахунку максимальної дальності дії скануючих ПЧ-приладів

Для прикладу на рис 3.17 показана методика розрахунку при наступних вихідних даних: $\frac{D_{об}}{f_{об}} = 5$; $\xi = 10$; $T_{огл} = 1$ с; $\gamma = 1$ ср; $t_{п} = 10^{-4}$ с; $\tau_a = \tau_{оп} = 0,7$; $\xi T_{огл} / \gamma t_{п} = 10^5$; $I_{\lambda ср} = 200$ Вт/ср; $F_{пор} = 10^{-9}$ Вт.

Так як всі спектральні величини дано середніми значеннями, то

$$\int_0^{\infty} \frac{I_{\lambda} \tau_a \tau_{оп}}{F_{пор}} d\lambda = \frac{I_{\lambda ср} \tau_a \tau_{оп}}{F_{пор}} = \frac{200 \cdot 0,7^2}{10^{-9}} \approx 10^{11} \text{ Вт/ср.}$$

На номограмі проводимо лінію між точками $D_{об}/f_{об} = 5$ та $\xi T_{обз}/\gamma t_{п} = 10^5$; на шкалі a отримуємо допоміжну точку c , яку з'єднуємо прямою лінією з точкою b , що відповідає інтегралу $\int_0^{\infty} F_{пор} / (I_{\lambda} \tau_a \tau_{оп}) d\lambda = 10^{11}$. У точці перетину цієї прямої зі шкалою $L_{макс}$ знаходимо $L_{макс} = 26$ мор. миль (48 км).

Таким чином тепlopеленгатор IRST із заданими характеристиками має можливість виявляти повітряні судна із імовірністю не менше 0,8 на дальностях 45-48 км при температурі випромінення 327°C.

3.6. Виявлення тепlopеленгатором низькотемпературних об'єктів

До високотемпературних об'єктів слід віднести об'єкти із температурою випромінення вище 300°C, які випромінюють ІЧ хвилі довжиною 2-5 мкм, А до низькотемпературних об'єктів слід відносити об'єкти із довжинами хвиль 8-12 мкм, що відповідає температурі випромінювання 40-120°C.

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 її довжини хвилі.

Промені, що виникають за рахунок зміни температури та фізичних властивостей тіл, називають тепловими, а процес їхнього розповсюдження тепловим (інфрачервоним) випромінюванням ($\lambda = 0.4...200$ 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. 15).

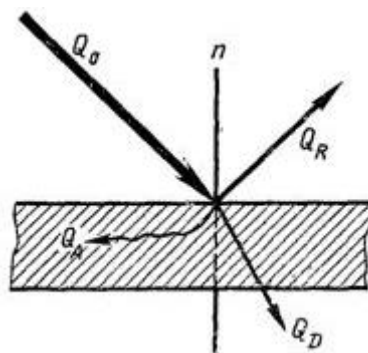


Рис. 3.15. Схема розподілу променистої енергії

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:

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

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 $R = 1 - A$).

Враховуючи, що для зменшення ваги БПЛА використовується алюміній, а максимальна температура електричної силової установки не перевищує 80°C , розглянемо можливість виявлення БПЛА типу «Квадрокоптер» інфрачервоною системою огляду повітряного простору. [13]

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.

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 (Quadro Copter), 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 $\Phi_{QC} > \Phi_L$

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:

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

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.

Графік представлений на рис. 3.16. показав, що потік власного випромінювання квадрокоптера на відстані 5000 м близький або нижче рівня порогової чутливості тепlopеленгатора $\Phi_L = 10^{-9}$ Вт.

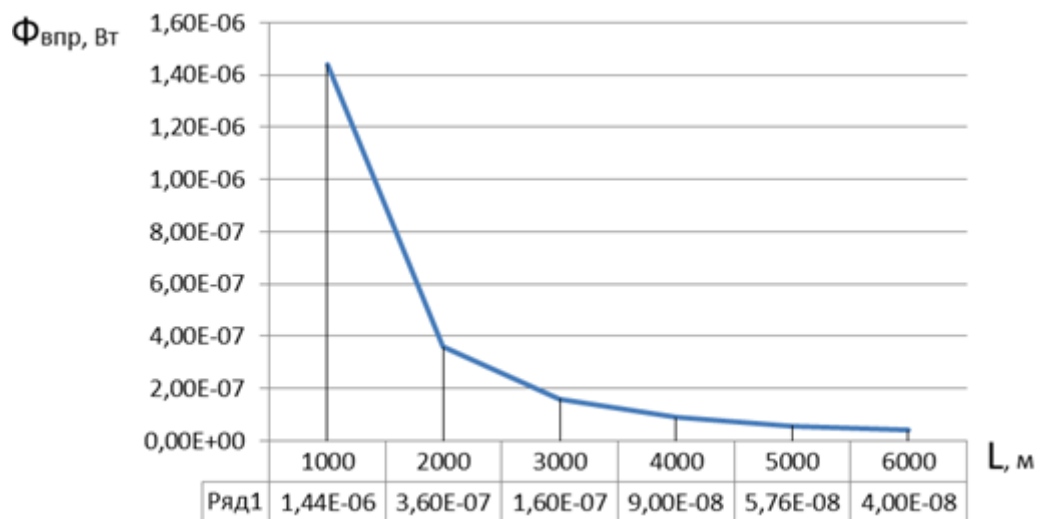


Рис. 3.16. Залежність потоку власного випромінювання квадрокоптера від відстані до тепlopеленгатора

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 хвилі близькою до власного випромінення.

У цьому випадку сумарний або результуючий потік випромінювання квадрокоптера ($\Phi_{рез}$) складається із власного потоку випромінювання об'єкта ($\Phi_{впр}$) та потоку лазерного випромінення відбитого від нього ($\Phi_{лпр}$):

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

Результуючий потік випромінювання та власного випромінювання квадрокоптера представлено на рис. 3.17.

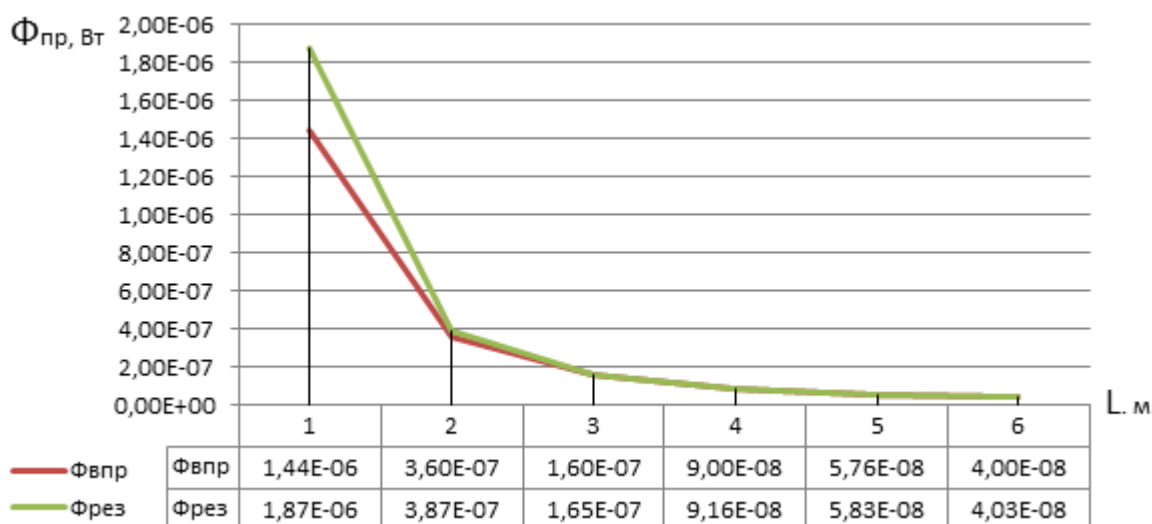


Рис. 3.17. Залежність сумарного потоку випромінювання БПЛА від відстані до тепlopеленгатора

Аналіз залежності результуючого потоку випромінювання від відстані до тепlopеленгатора показав, що навіть на відстанях більше 3000 метрів рівень результуючого випромінювання перевищує порогову чутливість приймача інфрачервоного випромінювання, що дасть можливість виявляти БПЛА на відстанях, достатніх для його виявлення та знешкодження.

Для прикладу на рис 3.18 представлено інфрачервоне зображення БПЛА типу коптер на малій відстані отримане системою FLIR.

На рис 3.19 представлено реалізований інтегрований комплекс моніторингу повітряного простору, як спільний проект компаній OpenWorks Engineering і Robin Radar Systems який включає в себе мікродоплерівський радар IRIS та оптичну систему Vision Flex оснащену телевізійною камерою (HD daylight EO) та інфрачервоною системою (Cooled thermal MWIR sensors).



Рис. 3.18. Інфрачервоне зображення БПЛА отримане системою FLIR



Рис. 3.19. Інтегрований комплекс моніторинг OpenWorks Engineering і Robin Radar Systems

Таким чином, застосування лазерної підсвітки низькотемпературних повітряних об'єктів широким променем інфрачервоного діапазону у

відповідності до діапазону власного випромінювання об'єкта, дозволить освітити всі повітряні об'єкти за напрямком спостереження, що збільшить їх енергію ПЧ випромінювання і дозволить виявити інфрачервоними засобами виявлення БПЛА на дальностях до 5 км. А застосування системи для виявлення високотемпературних БПЛА збільшить дальність виявлення до 40 км.

Загалом застосування інтегрованого комплексу моніторингу повітряного простору, у складі мікродплерівського радара X діапазона, інфрачервоної системи FLIR/IRST та лазерного прожектора інфрачервоного діапазону дозволить виявляти всі сучасні БПЛА оснащені тепловими чи електродвигунами на мінімальній дальності від 5 км і більше, що достатньо для їх знешкодження чи локалізації.