

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний

(повна назва інституту/факультету)

Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

(повна назва кафедри)

УДК 681.7(02)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Н. І. Бурау

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 202_р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва спеціальності)

на тему: Динамічне спостереження верхньої напівсфери оптико-електронними засобами

Виконав: студент 2 курсу, групи ПГ-11 мп

(шифр групи)

Корнєв Дмитро Владиславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н., проф. Микитенко В.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Стартап д.е.н., проф., Бояринова К.О.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Рівень вищої освіти –другий (магістерський)

Спеціальність – 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма - Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студента

Корнєва Дмитра Владиславовича

1. Тема дисертації «Динамічне спостереження верхньої напівсфери оптико-електронними засобами», науковий керівник дисертації д.т.н., проф. Микитенко В.І. затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації «06» грудня 2022 р.
3. Об'єкт дослідження: Дистанційне спостереження об'єктів на однорідному фоні в інфрачервоному діапазоні.
4. Предмет: Ефективність тепловізійна система спостереження за оточенням.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
 - 5.1 Огляд технічних параметрів існуючих БПЛА, класифікація за габаритами, параметрами польоту
 - 5.2 Патентний пошук та бібліографічний огляд оптико-електронних методів та засобів огляду простору в реальному масштабі часу, вибір аналогів, прототипу оптико-електронної системи

5.3 Створення математичної моделі габаритно-швидкісних характеристик типових малих БПЛА в просторі об'єктів та в просторі зображень

5.4 Вибір елементної бази оптико-електронної системи, уточнення технічного рішення з допомогою енергетичних розрахунків енергетичних розрахунків

5.5 Оцінка ймовірнісних характеристик виявлення при використанні запропонованого технічного рішення

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу презентація _____

7. Орієнтовний перелік публікацій

7.1. Корнєв Д. В., Микитенко В. І. Пошук перспективних методів виявлення безпілотних літальних апаратів // Збірник праць XVII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 7-8 грудня. – 2021. – с. 49-52.

7.2. Корнєв Д. В., Микитенко В. І. Попередній аналіз можливостей тепловізійної системи по виявленню БПЛА // Збірник праць XV всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 14-15 червня. – 2022. – с. 53-56.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<u>Стартап</u>	<u>д.є.н., доцент, Бояринова К.О.</u>		

9. Дата видачі завдання 15 вересня 2022

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Провести огляд проблеми	22.09.2022	

2	Провести огляд існуючих БПЛА	29.09.2022	
3	Провести огляд схем спостереження за навколишнім середовищем	06.10.2022	
4	Попередні геометричні розрахунки	13.10.2022	
5	Математична модель дистанційних спостережень з використанням поляриметричної інформації	27.10.2022	
6	Дослідження математичної моделі	11.11.2022	
7	Розроблення пропозицій щодо технічної реалізації методів дистанційного спостереження		
7	Розроблення стартап-проєкту	18.11.2022	
8	Оформлення рукопису	05.12.2022	

Студент

(підпис)

Д.В. КОРНЄВ

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

В.І. МИКИТЕНКО

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерський проект «Динамічне спостереження верхньої напівсфери оптико-електронними засобами»

Обсяг роботи – 112с., 36 ілюстрації, 32 таблиця, 43 джерел посилань.

Актуальність роботи полягає у збільшенні попиту на технічні рішення щодо підвищення ефективності забезпечення безпеки свого оточення різними методами в тому числі і оптичними. Станом на сьогодні безпілотні літальні апарати (БПЛА) набрали велику популярність завдяки своїй простоті та універсальності, тож з'явився попит на системи спостереження та захисту своєї території.

Одним з найперспективніших методів для даної задачі є оптичний з використанням інфрачервоного спектру випромінення, завдяки можливості бачити об'єкти які невидимі людському зору та невеликій залежності від погодних умов.

Одним з шляхів суттєво покращити показники даної технології є додання поляризаційного елементу в систему, який повинен значно підвищити контраст між об'єктом та фоном для більш простого виявлення об'єктів.

Об'єктом дослідження є дистанційне спостереження об'єктів на однорідному фоні в інфрачервоному діапазоні.

Предметом дослідження є ефективність тепловізійна система спостереження за оточенням.

Мета роботи полягає в дослідженні ефективності тепловізійного каналу для виявлення БПЛА з встановленим у нього поляризаційного елементу та представлення доступних схем реалізація даної системи та схем для перекриття верхньої полусфери неба для безперервного пошуку БПЛА у заданій зоні.

ABSTRACT

Master's project " Dynamic observation of the upper hemisphere optical and electronic means "

The volume of work is 112 pages, 36 illustrations, 32 tables, 43 sources of references.

TOPICALY

Today we have the increased demand for technical solutions to increase the efficiency of ensuring the safety of one's surroundings by various methods, including optical ones. As of today, unmanned aerial vehicles (UAVs) have gained great popularity due to their simplicity and versatility, so there has been a demand for surveillance and protection systems for their territory.

One of the most promising methods for this task is optical using the infrared spectrum of radiation, due to the ability to see objects that are invisible to human vision and a small dependence on weather conditions.

One of the ways to significantly improve the performance of this technology is to add a polarizing element to the system, which should significantly increase the contrast between the object and the background for easier detection of objects.

The object of the research is remote observation of objects on a homogeneous background in the infrared range.

The subject of the study is the effectiveness of the thermal imaging system for monitoring the environment.

The purpose of the work is to investigate the effectiveness of the thermal imaging channel for detecting UAVs with a polarizing element installed in it and to present the available schemes for the implementation of this system and schemes for overlapping the upper hemisphere of the sky for the continuous search of UAVs in a given area.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ПРОЕКТУ	11
1.1 Безпілотний літальний апарат.....	11
1.2 Типові БПЛА	13
1.2.1 RAM UAV	14
1.2.2 ОРЛАН-30	15
1.2.3 Байрактар ТВ2	16
1.2.4 Сокіл-300.....	18
1.3 Методи виявлення та стеження за БПЛА	19
1.4. Оптичні методи	20
1.5 Оптико-електрона система.....	23
1.6 Складність виявлення об'єкту на однорідному фоні	23
1.7 Висновок до розділу 1.....	24
РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД АНАЛОГІВ СТРУКТУРНИХ СХЕМ КАМЕРИ ТА	
ПОКРИТТЯ ВЕРХНЬОЇ ПОЛУСФЕРИ	25
2.1 Огляд аналогів структурних схем камери з поляризатором.....	25
2.1.1 Блок камер з встановленими перед ними поляризаторами	25
2.1.2 Система з поляризатором, що постійно обертається	26
2.1.3 Схема з поляризатором, що обертається ривками.....	28
2.1.4 Схема з колесом поляризаторів, що обертається.....	29
2.1.5 Схема з колесом повороту та колесом фільтрів.....	30
2.1.6 Схема з розділенням випромінювання на рівні частини	31
2.1.7 Схема з поляризаційною матрицею	33
2.2 Перекриття верхньої полусфери.....	33
2.2.1 Схема зі стаціонарних камер, що перекривають всю полусферу	35
2.2.2 Сканування простору одним рядом камер	37

2.2.3 Сканування простору стовпцем з камер	38
2.2.4 Система патрулювання однією чи декількома камерами	40
2.2.5 Розширення поля зору лінзою типу рибне око	44
2.3 Висновки до розділу 2	44
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА РОЗРАХУНКИ	46
3.1 Математична модель	46
3.1.1 Енергетичні характеристики	46
3.1.1.1 Закони теплового випромінювання	46
3.1.1.2 Енергетична яскравість	49
3.1.1.3 Потік випромінювання	50
3.1.2 Поляризація	52
3.1.2.1 Поляризаційні характеристики	52
3.1.2.2 Поляризація відбиття та випромінювання	58
3.1.2.2.1 Поляризація відбиття	58
3.1.2.2.2 Поляризація випромінювання	60
3.1.2.3 Вектори Стокса	62
3.1.3 Сигнали та відношення сигнал/шум	64
3.1.3.1 Сигнал	65
3.1.3.2 Відношення сигнал/шум	65
3.2 Розрахунки за математичною моделлю	66
3.2.1 Геометричні розрахунки	67
3.2.2 Енергетичні розрахунки	72
3.3 Ймовірність виявлення об'єкту	87
3.4 Висновки до розділу 3	88
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	90
4.1 Опис ідеї проєкту	91
4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту	92
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту	93
4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту	100
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	102

4.6 Висновки до четвертого розділу.....	105
ВИСНОВКИ.....	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	108

ВСТУП

Через підвищений інтерес до безпілотних літальних апаратів, який обумовлений їхньою неймовірною універсальністю, підвищився попит і на системи, які можуть захистити людей, чи територію від стеження та нападу за допомогою безпілотних літальних апаратів. Тож наразі швидко наростає кількість можливих рішень по виявленню, стеженню та знешкодженню таких апаратів.

В даній роботі будуть розглянуті різні системи виявлення безпілотних літальних апаратів і розглянуті перспективи розвитку оптичного методу виявлення, а саме виявлення за допомогою інфрачервоного поляризаційного каналу. Також будуть розглянуті можливості реалізації такого поляризаційного каналу. Основою розгляду стане отриманих відношень сигнал/шум для різних положень поляризатора та для варіанту без поляризатора.

В кінці буде запропонований можливий стартап проект для успішної реалізації розглянутого у роботі матеріалу.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ПРОЕКТУ

1.1 Безпілотний літальний апарат

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – літальний апарат без екіпажу на борту, політ якого здійснюється по програмно-закладеному маршруту або шляхом віддаленого керування [1].

Можна виділити 2 типи БПЛА, літакового або вертолїтного, відповідно до способу польоту (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Приклади БПЛА [1]

БПЛА застосовуються у багатьох сферах життя безліччю способів, від доставки товарів, до діагностики і ремонту віддалених та важко доступних місць. Універсальність БПЛА і такі характеристики, як малий розмір, швидкість, маневреність, мала інерційність та найменша мінімальна висота польоту серед літальних апаратів, забезпечили їх використання у військовій сфері, де їх почали застосовувати для розвідки, бойових дій тощо. Це призвело до необхідності розробки засобів для виявлення та спостереження БПЛА.

БПЛА можливо розділити на класи (Таб. 1.1):

Таблиця 1.1 - Класифікація БПЛА [2]

Клас БПЛА	Категорія	Міжнародне позначення	Позначення	Назва	Вага, кг	Радіус дії, км	Практична межа, км	Тривалість польоту, год
Малі	I	η	η	Нано	до 0,025	до 1	0,1	≤1
		μ	μ	Мікро	до 5	до 10	3	1
		mini	міні	Міні	до 25	10-40	3	≤4
Легкі	II	CR	БлД	Ближньої дії класу 1	25-50	25-75	3	2-4
				Ближньої дії класу 2	50-150	50-100	3	≤6
Середні	III	SR	МД	Малої дальності	до 200	до 150	4	6-8
		MR	СД	Середньої дальності	до 500	200	5	10-12
	IV	MRE		Середньої дальності з великою тривалістю польоту	до 500	500	8	10-18
		LADP	БД	Маловисотний з великою дальністю	до 250	більше 250	до 4	1,5-2
		LALE		Маловисотний з великою тривалістю польоту	до 250	більше 500	4	18
Тяжкі	V	LALE	БД	Середньовисотний з великою тривалістю польоту	до 100	більше 1000	8	24
	V-VI	MALE						

	VII	HALE		Висотний з великою тривалістю польота	до 2500	більше 4000	20	більше 24
Бойові	VIII	UCAV	Б	Безпілотний ударний	більше 1000	більше 500	12	1,5-2
		DEG		Помилкова ціль	150-500	0-500	0,05-5	до 4
		TGT		Повітряна ціль	10-1000	5-200	0,05-10	Більше 0,5
Змішані	IX	OPA	ОП	Пілотований по вибору (опційно) ЛА	до 200			
		CMA	ПП	Переобладнений пілотований ЛА				

Із не вказаних характеристик особливо необхідно виділити швидкість, що в залежності від декількох кілометрів, до 1000 км/год, що напряду впливає на складність виявлення БПЛА.

1.2 Типові БПЛА

Для покращення розуміння БПЛА у даному підрозділі будуть розглянуті БПЛУ різних типів. Будуть представленні такі безпілотники:

- RAM типу CR
- ОРЛАН-30 типу SR
- Байрактар TB2 типу MR
- Сокіл 300 типу LADP/LALE

1.2.1 RAM UAV

RAM UAV (рис. 1.2) — дрон-камікадзе типу Close Range, презентований у лютому 2018 року на виставці в Абу-Дабі, розроблений товариством з обмеженою відповідальністю «Компанія оборонних і радіоелектронних технологій». Основне призначення даного БПЛА складається у виявленні та ураженні наземних та надводних цілей та систем протиповітряної оборони [3].



Рисунок 1.2 – БПЛА RAM [4]

Приводиться до руху за допомогою електродвигуна, який забезпечує дальність польоту у 30 км з швидкістю 70км/год, максимальний час польоту складає 40 хвилин. Що є гарними показниками при габаритах 1,78 на 2,3 метри та масі 8 кг.

Система запуску представляє собою катапульту-рогатку, яка встановлюється на поверхні землі або на кузов грозових авто. Система наведення працює через телевізійний канал.

На основі цього БПЛА розроблена наступна модель RAM 2, який має схожі швидкісні характеристики при ще менших розмірах, а саме 1,54 на 2-2,3 метри в залежності від оснащення, та більшому часі польоту у 55-60 хвилин.

1.2.2 ОРЛАН-30

ОРЛАН-30 (рис. 1.3) – багатоцільовий БПЛА типу Short Range, який представляє собою покращений БПЛА ОРЛАН-10. Обидва в основному застосовуються для розвідки та наведення артилерії на позиції ворога. Реалізується це завдяки можливості нести до 8 кілограм корисного навантаження, що дозволяє мати на борту камеру з системою авто-стабілізації, прилади радіолокаційної розвідки, лазерний далекомір-цілевказівник [5].



Рисунок 1.3 – БПЛА RAM [5]

Основні характеристики даного БПЛА:

- Максимальна швидкість: 170 км/год
- Максимальна висота: 5 км
- Дальність польоту: 300 км
- Радіус польоту: 150 км
- Тривалість польоту: 5 годин
- Льотна маса: 27 кг

- Корисна маса: 8 кг
- Довжина: 2.5 м
- Розмах крил: 5 м

БПЛА запускається за допомогою рогатки встановленої на землі або на спеціально підготовленої машини грузовика, що дає час увійти бензиновому двигуну у робочій режим та створити тягу. Після вильоту даний БПЛА може керуватися дистанційно чи летіти по попередньо встановленій траєкторії, яка підтримує до 60 точок маршруту.

1.2.3 Байрактар ТВ2

Байрактар ТВ2 (рис. 1.4) – БПЛА типу Middle Range призначений для розвідки та спостереження за територією ворога, розроблений турецькою компанією Baykar. Цей БПЛА може бути під контролем оператора, чи працювати самостійно на основі попередньо записаної програми. Його застосовують для розвідки, спостереження чи завдання ударів біля противника. Для ураження цілі безпілотною має керовані авіабомби з лазерним наведенням МАМ у кількості чотирьох штук, в залежанні від мети місії можуть бути замінені на ракети, торпеди та інше. На борту встановлені засоби спостереження за околицями середовищем, тамі як радіолокаційні системи, лазерні далекоміри, група камер, що забезпечує спостереження навколо БПЛА у різних спектрах випромінювання для максимізації отриманої інформації [6].



Рисунок 1.4 – БПЛА Байрактар ТВ2 [6]

Характеристики Байрактар ТВ2:

- Максимальна швидкість: 222 км/год
- Максимальна висота: 8.2 км
- Дальність польоту: 1000 км
- Радіус польоту: 300 км
- Тривалість польоту: 24 годин
- Корисна маса: 55 кг
- Довжина: 6.5 м
- Розмах крил: 12 м
- Висота: 2.2 м

БПЛА підіймається в повітря з злітної полоси завдяки власній тязі, створений бензиновим двигуном, для якого на БПЛА знаходиться паливний бак на 300 літрів.

1.2.4 Сокіл-300

Сокіл-300 (рис. 1.5) – український проект ударного БПЛА типу LADP/LALE, розроблений в конструкторському бюро «ЛУЧ». Комплекс призначений для ведення розвідки та завдання ударів на оперативну і тактичну глибину противника [7].



Рисунок 1.5 – БПЛА Сокіл-300 [7]

Даний БПЛА має можливість бути оснащеним одним з трьох двигунів:

- АИ-450Т2
- МС-500В-05С/СЕ
- Rotax 914

В залежності від встановленого двигуна БПЛА буде мати різні характеристики, а саме різний час польоту, максимальну швидкість та дальність.

Керується БПЛА відбувається з командного пункту, який спряжений з ракетним комплексом «Нептун» на відстані до 150 км, яка може бути збільшена завдяки ретрансляторам до 300 і більше кілометрів. Або може виконувати завдання по

попередньо заданій програмі, чи літати та надавати отриману інформацію по контрольним точкам на карті.

Для навігації використовується радіолокаційна система SAR та оптико-електронну гіростабілізаційну прицільну станцію наведення, яка використовується візуального нагляду та наведення ракет.

Характеристики наведені в діапазоні через можливість встановлення різних двигунів:

- Максимальна швидкість: 150-580 км/год
- Максимальна висота: 8 км
- Дальність польоту: 1300-3300 км
- Радіус польоту: 150-300+ км
- Тривалість польоту: 5-24 годин
- Корисна маса: 300 кг
- Довжина: 8.57 м
- Розмах крил: 14 м

1.3 Методи виявлення та спостереження за БПЛА

Всі методи виявлення БПЛА можна поділити на ряд основних груп та їх підгрупами [8, 9]:

1. Радіо – метод оснований на спостереженні за БПЛА на основі втраченого випромінення радіо-локаційних систем БПЛА. Є два основних радіо-локаційних методу:

1.1 Активний радіо-частотний метод

1.2 Пасивний радіо-частотний метод

2. Акустичні – метод оснований на спостереженні за звуковим оточенням та його змінами.

3. Оптичні – оптичний метод оснований на спостереженні оком через оптичний засіб. Оптико-електронні методи, діляться по діапазону в якому вони працюють:

3.1 Телевізійний метод (Видимий діапазон)

3.2 Тепловізійний (ІЧ) метод

Кожен метод є дієвим і широко використовується, проте має недоліки, які необхідно враховувати.

Так радіо методи ефективні на великій дистанції і можуть ігнорувати природні перешкоди та не має проблем з розпізнаванням птахів та БПЛА, але не може точно ідентифікувати ціль та може вказати лише приблизний напрямок пеленгування БПЛА. А також на заваді може стати великий шум, що перебіє сигнал, від інших складових БПЛА чи від іншого джерела шумів.

Акустичний метод надзвичайно ефективний на невеликих відстанях проте може працювати лише при наявності гарних погодних умовах та однієї чи невеликої кількості цілей.

Телевізійний метод ефективний на великих відстанях, але має сильну залежність від яскравості середовища та погодних умов, ефективність даної методу можливо покращити алгоритмами, що будуть наведені та розглянуті далі.

Тепловізійний метод має високу ефективність завдяки можливості спостерігати об'єкти за різноманітними перешкодами будучі незалежним від стану погоди та часу дня. Недоліком є тепловізійні камери та сенсори, які мають малу роздільну, що дає значно гірше зображення відносно оптичного методу та ускладнює індексацію об'єкта [10].

Перевага оптичних методів над іншими полягає у надзвичайно ефективній співпраці, що дозволяє закривати недоліки один одного та відкриваючи величезний потенціал для подальшого розвитку та застосування.

1.4 Оптичні методи

Оптичні методи, з конструктивної точки зору, як правило, передбачають застосування деякої спеціальної передавальної камери (або застосування двох камер,

якщо система бінокулярна). Зазвичай, ця камера розташовується на електромеханічному пристрої, що використовується для повороту навколо осей.

Оптичні системи можуть мати різні масо-габаритні та споживчі характеристики, в залежності від потреб користувача, а саме:

- Дистанція виявлення об'єкту спостереження може досягати 5 км;
- Поле зору по горизонталі може бути у діапазоні від 30 до 360 градусів, а по вертикалі досягати 20 градусів;
- Системи можуть бути стаціонарними або мобільними (пересувними). Стаціонарі системи встановлюються на певне місце та працюють на ньому, а мобільні можна пересувати та застосовувати у різних місцях;
- В залежності від алгоритму обробки зображення, зазвичай, достатньо реєстрації лише 1-2 пікселів для того, щоб виявити об'єкт;
- Система може бути розрахована для ручного керування, або оснажена автоматичним керуванням;
- Масо-габаритні характеристики різняться, в залежності від пристрою. Це може бути легкий малий мобільний пристрій або надвеликий та надтяжкий стаціонарний комплекс, що транспортується за допомогою вантажних автомобілів або спеціальної техніки;
- Виявлення та класифікація об'єкту, як правило, займає не більше 2 секунд;
- Різні системи, в залежності від характеристик та властивостей, можуть відслідковувати одночасно один або декілька об'єктів;

На сьогоднішній день, оптичний метод досить часто передбачає застосування нейронних мереж та засобів комп'ютерного зору. Комп'ютерний зід дозволяє обробляти відео, окремі його фрагменти або кадри у реальному часі, підмічаючи та виділяючи будь-які зміни зображення та відокремлюючи певні деталі. Нейронні мережі, в свою чергу, дозволяють ідентифікувати об'єкти, за якими ведеться спостереження, що вирішує проблему неможливості розпізнавання та знаходження різниці між птахами та МБЛА. Крім цього існують алгоритми спостереження за

об'єктом, які дозволяють передбачити його рух, що надає можливість відмовитися від модуля лазерного спостереження, який досить часто наявний у системах стеження.

Як правило, ІЧ методи відрізняються від телевізійних не лише тим, що вони працюють в ІЧ діапазоні, а ще й тим, що, зазвичай, не використовують нейронні мережі. Через це втрачається можливість точної ідентифікації об'єкту. Для їх застосування є дві причини:

1. У ІЧ діапазоні, між фоном та об'єктом, є контраст достатньої величини для застосовувати лише комп'ютерного зору;
2. У ІЧ діапазоні відсутній достатньо великий набір прикладів зображень птахів та МБЛА.

Однак, також існує метод спостереження у поляризованому ІЧ діапазоні. У такому випадку до конструкції додається лінійний поляризатор, який дає можливість спостерігати об'єкти у високому контрасті з фоном. Також може додаватися комбінація з лінійного поляризатора та хвильової пластинки, яка дозволяє вимірювати вектори Стокса та за допомогою них зробити ідентифікацію об'єкта [11].

Об'єднання двох методів дозволяє покращити роботу кожного з них. Наприклад, ІЧ засоби спостереження можуть ефективніше виявляти та ідентифікувати об'єкти під час поганих погодних умов, у темряві або в оточенні природних елементів. Паралельне застосування, в свою чергу, надає можливість створити достатню кількість інформації для тренування нейронної мережі для ІЧ діапазону. Крім цього, застосувавши алгоритм розділення зображення по природному горизонту, можна розділити функції окремих інформаційних каналів: тепловізійний канал буде обробляти ту складову зображення, яка пов'язана за природними об'єктами, а телевізійний буде відповідати за зону неба [12]. У такому випадку будуть мати велике значення методи комплексування інформаційних каналів [13]. При цьому буде очевидною необхідність використання автоматизації процесу вилучення корисної інформації з сигналів ІЧ та телевізійного каналів.

1.5 Оптико-електрона система

Оптико-електрона система (ОЕС) – система, що реєструє сигнали у оптичному спектральному діапазоні. Оптичний спектральний діапазон складається з трьох окремих діапазонів, які плавно переходять один в одного:

1. Видимий
2. Інфрачервоний (ІЧ)
3. Ультрафіолетовий (УФ) діапазони.

З цього зрозуміло, що є 3 основні ОЕС:

1. Відеокамера, що реєструє сигнали у видимому діапазоні.
2. Тепловізор, що реєструє сигнал у ІЧ діапазоні.
3. УФ-приймач, що реєструє сигнал у УФ діапазоні.

Окрім основних, також існують суміжні ОЕС, які одночасно можуть працювати у декількох діапазонах. Особливо виділяються поляриметричні версії ОЕС, які надають нові можливості для спостереження в залежності від види ОЕС. Поляриметрична відеокамера дозволяє позбутися дефектів зображень таких як бліки. Тепловізор та УФ-приймач дозволяють спостерігати об'єкти з високим контрастом від середовища, а також досліджувати різні властивості об'єктів у відповідному спектральному діапазоні [14, 15].

1.6 Складність виявлення об'єкту на однорідному фоні

Головною проблемою є системи маскування, які призначені для розмиття об'єкту з фоном або прирівнювання його характеристик до характеристик фону [16]. Це може дуже сильно впливати на можливість розпізнати та виявити об'єкт на будь якому фоні, проте на однорідному проблема приймає більший склад через те, що однорідність представляє однакові чи майже однакові параметри оточення на всьому просторі, що значно спрощує задачу маскування через значно меншу кількість факторів та їхнього діапазону значень.

Додаткової складності додають параметри чутливості приймачів випромінення, а саме, якщо різниця сигналів об'єкта та фону буде менша за чутливість, тобто меншою шуми системи, то об'єкт зовсім зіллється з фоном і його не буде видно.

Тож задача при виявленні об'єкта визначається у максимізації контрасту між об'єктом та фоном, для полегшення його виявлення, і одним з способів є поляризація випромінення, яка розглядається у цій роботі для інфрачервоного випромінення.

1.7 Висновок до розділу 1

Як видно з першого розділу, є велика кількість різних БПЛА, що використовуються у безлічі задач у тому числі й в бойових, що максимізує необхідність систем виявлення та протидії БПЛА. На даний час є багато систем, що виконують функцію спостереження та захисту від БПЛА, проте кожна з цих систем має свої сильні та слабкі зони, тож є великий потенціал для подальшого розвитку даних систем, особливо для систем основаних на інфрачервоних технологіях.

2. ОГЛЯД АНАЛОГІВ СТРУКТУРНИХ СХЕМ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ КАМЕР ТА ПОКРИТТЯ ВЕРХНЬОЇ ПОЛУСФЕРИ

2.1 Огляд аналогів структурних схем камери з поляризатором

Для початку розробки математичної моделі необхідно обрати структуру схеми відносно якої будуть проводитись розрахунки з урахуванням її особливостей. Далі будуть розглянуті наступні схеми:

- Блок передавальних камер з встановленими перед ними поляризаторами
- Система з поляризатором, що постійно обертається
- Схема з поляризатором, що обертається ривками
- Схема з колесом поляризаторів, що обертається
- Схема з колесом повороту та колесом фільтрів
- Схема з розділенням випромінення на рівні частини

2.1.1 Блок камер з встановленими перед ними поляризаторами

Найпростіша схема, що складається з камер кількістю відповідною до необхідної кількості позицій поляризаторів з встановленими перед ними поляризаторами під необхідними кутами (рис. 2.1). Така схема надає можливість завжди отримувати інформацію у максимальній кількості лише у заданих положеннях і не дає можливості налаштувати положення у реальному часі, щоб отримати більше інформації, а також така система є дуже дорогою та громіздкою через необхідність окремої камери з поляризатором для кожного положення.

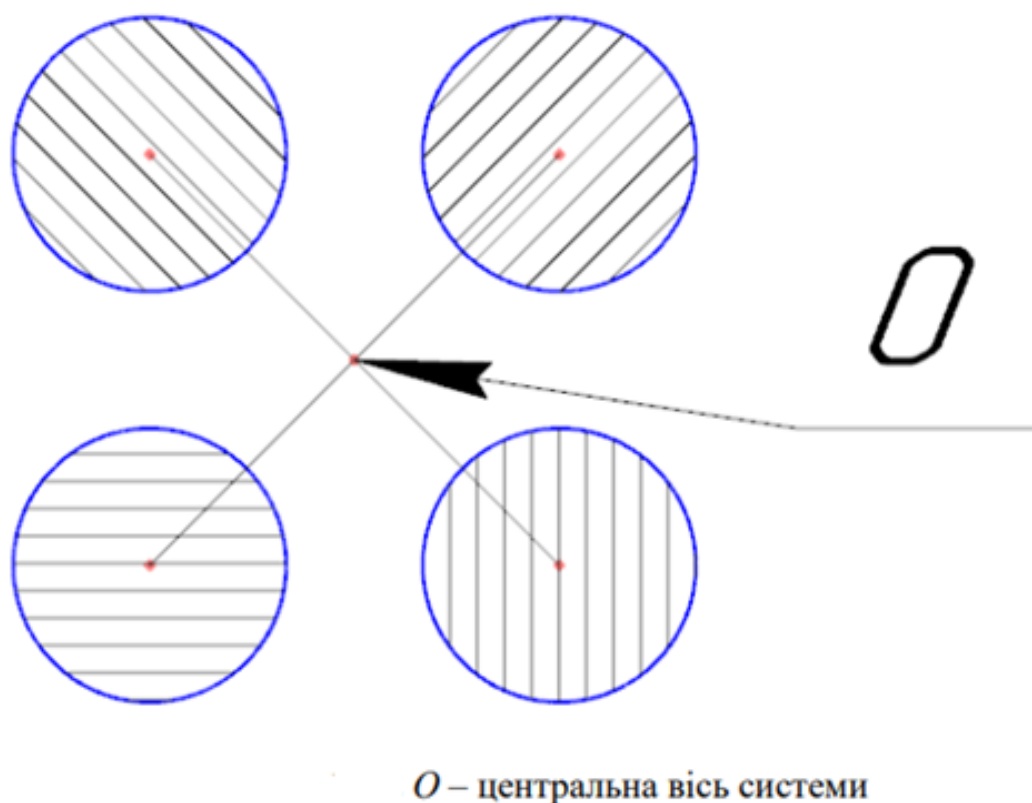


Рисунок 2.1 - Блок камер з встановленими перед ними поляризаторами

2.1.2 Система з поляризатором, що постійно обертається

Система представляє з себе камеру перед якою постійно обертається лінійний поляризатор (рис 2.2) [17]. Так для ефективної роботи необхідно щоб поляризатор обертався зі швидкістю достатньою щоб, за 1 секунду займати ту ж саму позицію, що і на початку, тобто на 180° , 360° і тд. Таким чином у кожний момент формування зображення поляризатор буде у певному положенні, що спрощує обробку отриманої інформації. Проте у даної схеми є недолік, що представляє збільшення розмиття

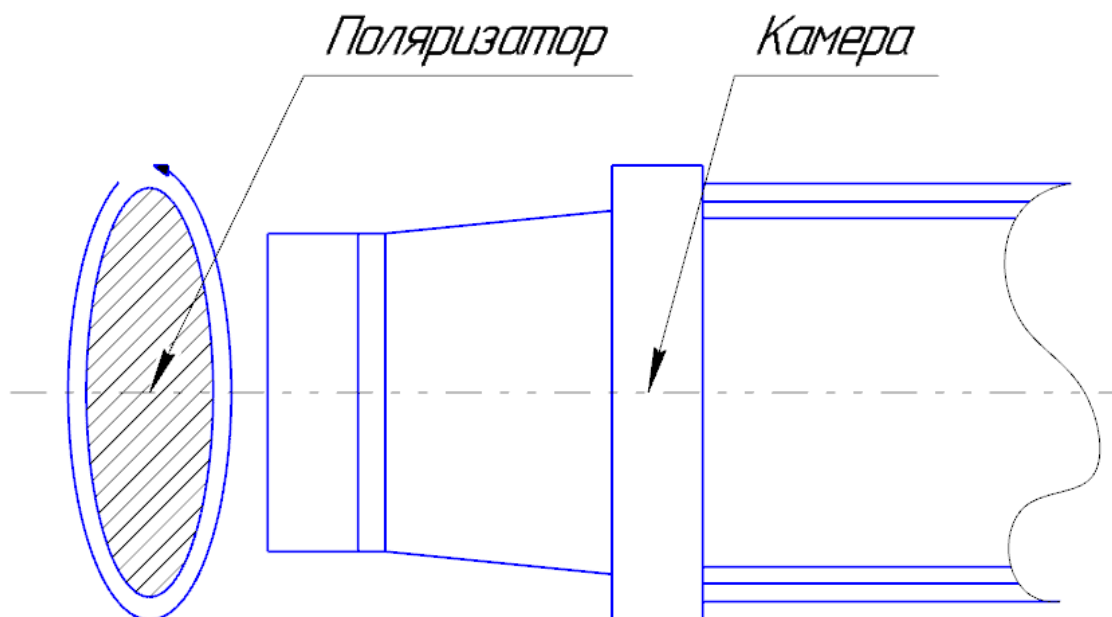


Рисунок 2.2 - Система з поляризатором, що постійно обертається [17]

об'єкту, яке зазвичай відбувається при русі об'єкту, що збільшується з віддаленням від центру зображення та збільшенням швидкості обертання поляризатора, яке виникає через обертання поляризатору безпосередньо під час формування кадру. Це розмиття необхідно враховувати в обчисленнях позиції об'єкту, щоб запобігти похибці, яку створює розмиття. Тож найкращим рішенням буде мінімізувати швидкість обертання поляризатор до 180° . Як елемент покращення можна взяти 2 або 4 такі системи з поляризаторами встановленими кутами поляризації 90° та 45° відносно один одного, що дозволить зменшити швидкість обертання в 2 та 4 рази відповідно, а також надасть більше положень поляризатора, що дасть більше інформації. Також при такому покращенні є ймовірність, що похибка розмиття стане досить незначною, щоб її ігнорувати при розрахунках. У такій схемі, якщо використовується двигун, що може обертати поляризатор в обидві сторони з швидким перемиканням напрямку руху, можна створити алгоритм, що буде постійно шукати максимальне відношення сигнал-шум для найкращої контрастності.

2.1.3 Схема з поляризатором, що обертається ривками

Система представляє з себе камеру перед якою обертається лінійний поляризатор ривками, наприклад завдяки храповому механізму (рис. 2.3). Принцип роботи схожий з поляризатором, що постійно обертається, проте у даній схемі поляризатор обертається ривками, це надає можливість швидко досягти наступного положення поляризатора і сформувати зображення з меншим ступенем розмиття, завдяки тому що зображення формувалось поки поляризатор знаходиться у статичному положенні.

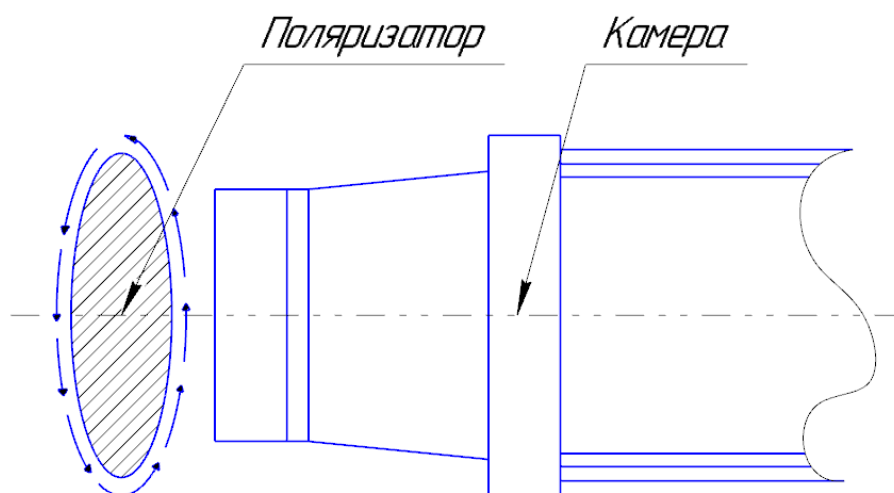


Рисунок 2.3 - Схема з поляризатором, що обертається ривками [17]

Як і з системою з поляризатором що постійно обертається, краще за все буде коли поляризатор за 1 секунду обертань встановлювався у те ж саме положення, яке було на початку обертань, тобто обертася на 180° , 360° і тд. Якщо швидкість зміни положення достатньо велика, то розмиття може бути достатньо малим, щоб розглядати його, як похибку яку не треба враховувати. Також в такій схемі можна віддати кожен другий кадр на переміщення поляризатору, що дасть можливість отримувати зображення без розмиття викликаним переміщенням поляризатором, але у вдвічі меншій кількості, що також означає, що кількість положень поляризатора

також зменшується вдвічі. Проте у такої схеми є суттєвий недолік у вигляді регулярних ризьких зупинок поляризатора. Такі зупинки призводять до швидкого зносу системи, а також до збільшення вірогідності збільшення похибки через мікрозсуви деталей, появи люфту, вібрацій, відбиття деталей один від одного і тд. Тож для такої схеми будуть підвищені вимоги для виготовлення з ціллю уникання вище наведених проблем. Ситуація з покращенням схеми така сама, що і з поляризатором, що постійно обертається, а саме збільшенням кількості таких систем де поляризатори встановлені під різними кутами один до одного. Таке покращення збільшує кількість положень поляризатора, що надає більше інформації, а також підвищує швидкість переходу поляризатора від одного положення до іншого, що також зменшує похибку, що створюється розмиттям, можливо навіть до такої, що може бути проігнорована. Також при використанні двох таких схем в режимі з пропуском кадру, можна зберегти таку саму кількість позицій поляризатора, що й на одній схемі без пропуску кадрів та з відсутньою похибкою від обертання поляризатора.

2.1.4 Схема з колесом поляризаторів, що обертається

Схема представляє камеру перед якою встановлене колесо з лінійними поляризаторами встановленими під певними кутами (рис 2.4) [18]. Така схема зовсім не підходить для встановленої задачі, через занадто довге повертання колеса під час якого на певний час також на певний час повністю перекривається поле зору камери, що призводить до втрати великої кількості інформації. Проте на основі такого колеса поляризаторів можна створити інші схеми, що підходять для даної задачі, які будуть розглянуті далі.

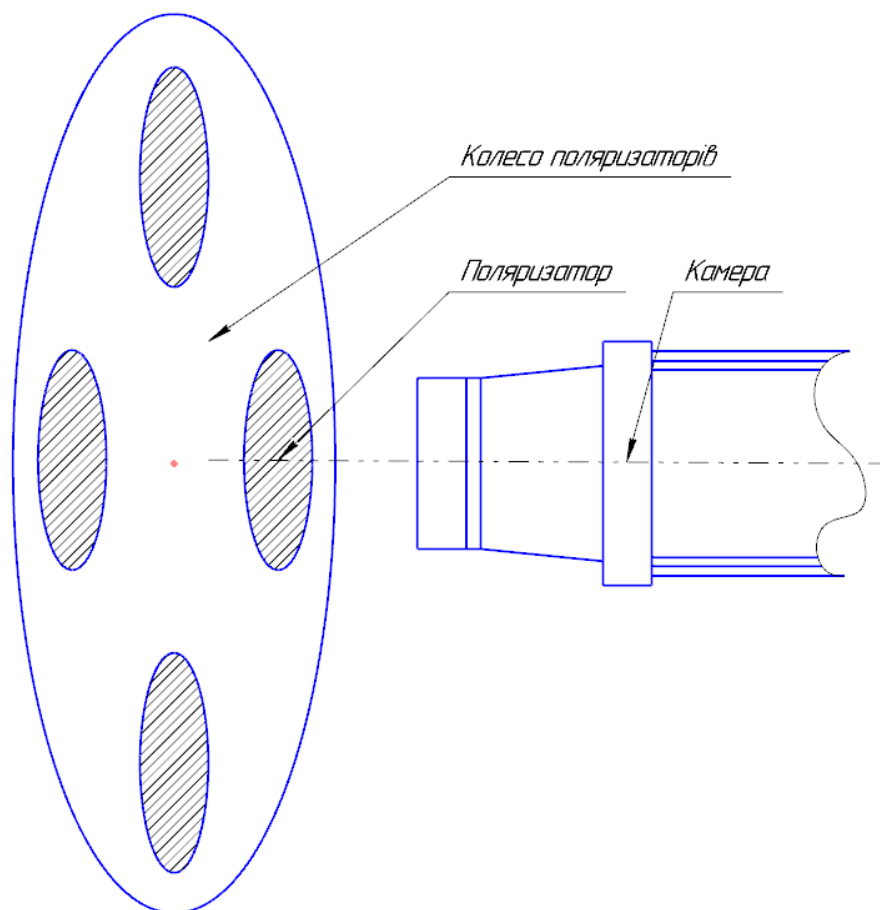


Рисунок 2.4 - Схема з колесом поляризаторів, що обертається [18]

2.1.5 Схема з колесом повороту та колесом фільтрів

Ця схема представляє з себе поєднання схеми з поляризатором, що обертається постійно або ривками та схеми з колесом (рис. 2.5) [18]. Колесо повороту необхідне для повороту поляризаторів і може бути виконане як постійним обертанням навколо осі так і ривками. Колесо фільтрів, за необхідності, дозволяє використовувати в схемі не тільки лінійний поляризатор, а й інші різноманітні фільтри або не використовувати зовсім нічого. Ця схема акумулює в собі всі ті самі переваги, недоліки та методи покращення, що й схеми з поляризатором, що обертається постійно або ривками, проте також надає вище приведену перевагу.

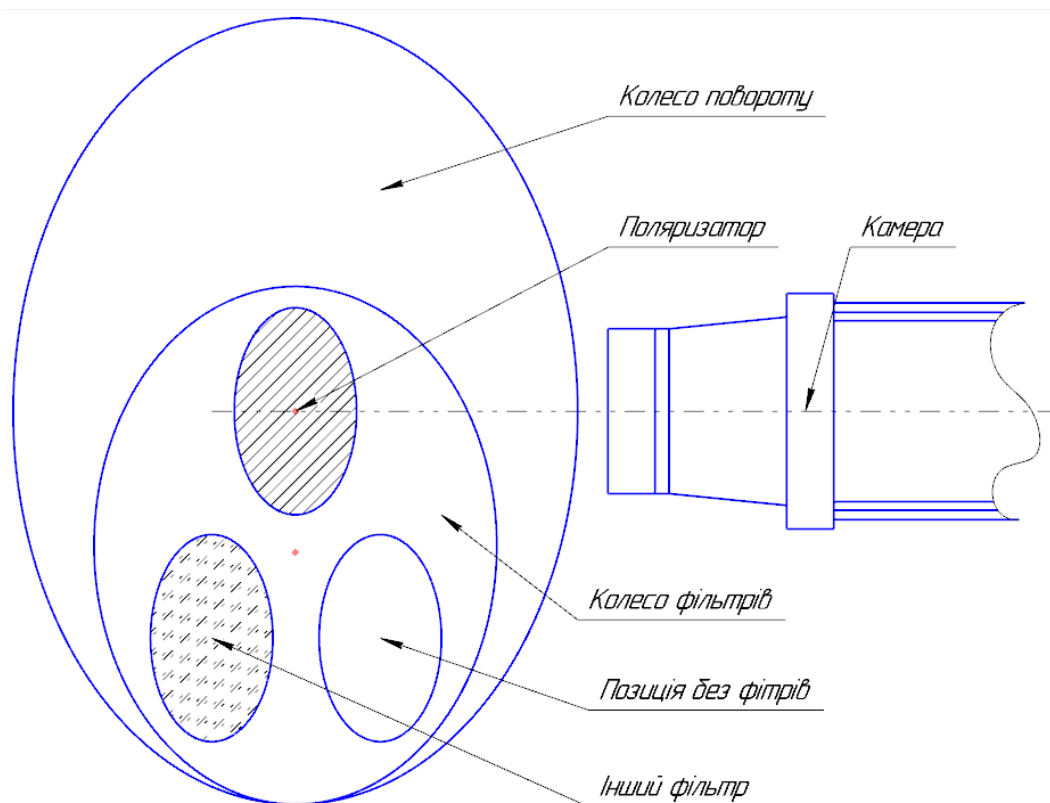


Рисунок 2.5 - Схема з колесом повороту та колесом фільтрів [18]

2.1.6 Схема з розділенням випромінювання на рівні частини

Схема представляє з себе блок, який ділить отримане випромінювання на рівні частини, кожна з яких проходить через свій поляризатор встановлений під необхідним кутом і потрапляє на окрему матрицю (рис 2.6), чи на певну виділену частину однієї матриці (рис 2.7). Ця схема представляє із себе щось подібне до блоку камер з поляризаторами, в якому можливо отримувати всю необхідну інформацію одночасно по всім необхідним положенням поляризаторів. Така схема менш габаритна за блок камер, але із-за цього має певні недоліки. Перш за все розділення випромінювання на рівні частини призводить до зменшення початкової якості випромінювання, також необхідно розуміти, що розділення відбувається за рахунок відбиття, яке вносить свої корективи у випромінювання, тобто створює додаткову

похибку яку необхідно враховувати та гарантовано призводить до втрат сигналу, що негативно впливає на кінцевий результат.

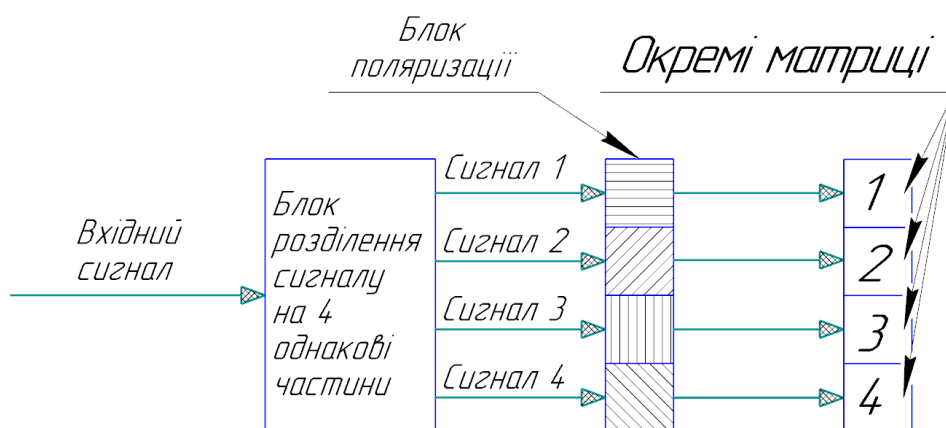


Рисунок 2.6 - Схема з розділенням випромінення на рівні частини, що потрапляють на окремі матриці

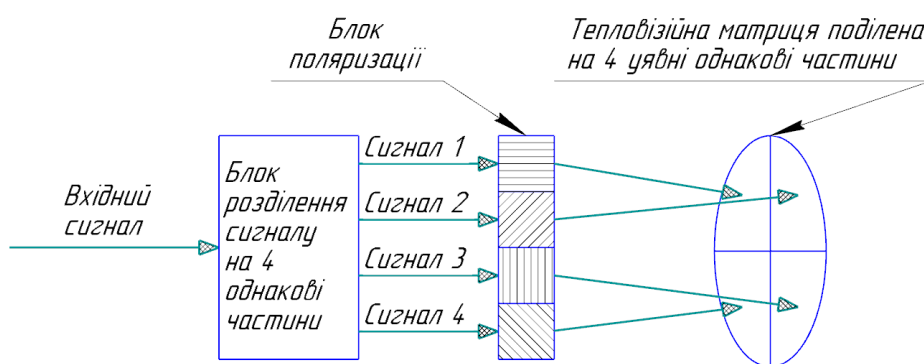


Рисунок 2.7 - Схема з розділенням випромінення на рівні частини, що потрапляють на одну матрицю

Також необхідно враховувати, що варіант з направленням на окремі матриці значно підвищує вартість, а також габарити схеми. В той час варіант з направленням випромінення на різні частини однієї матриці також має суттєві недоліки. Перш за все розділення матриці на частини означає зменшення роздільної здатності, що значно погіршує якість зображення, а з ним і кінцевий результат, тож для нормальної роботи

такого варіанту необхідна достатньо велика матриця або декілька розділених матриць, щоб для кожного поляризованого сигналу була достатньо велика роздільна здатність матриці для задовільного результату.

2.1.7 Схема з поляризаційною матрицею

Схема основана на матриці, кожен з пікселів якої складається з кількох субпікселей перед кожним з яких знаходиться поляризатор встановлений під певним кутом (рис. 2.8) [19].

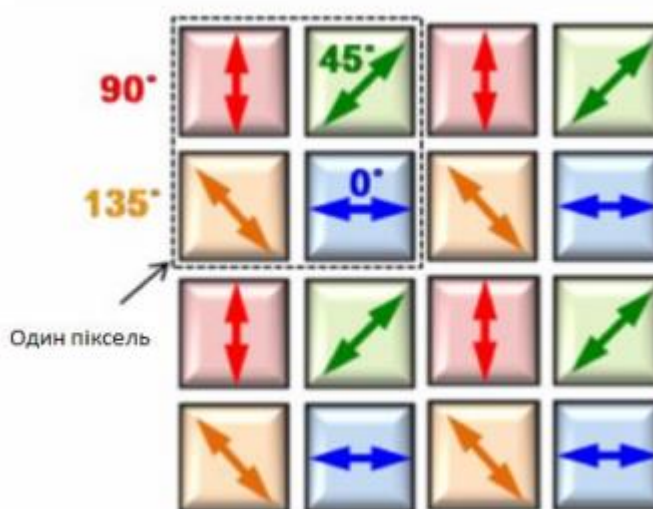


Рисунок 2.8 - Схема з поляризаційною матрицею [19]

Найпоширенішою є матриця з чотирьома субпікселями поляризованими з зміщенням поляризатора на 45°. За своєю суттю дана схема є мініатюрною версією блоку камер і позбавлена недоліку великих габаритів. Проте на даний момент такі матриці являються дуже дорогими для виготовлення при наданні далеко не найкращих характеристик, що робить їх не релевантними на даний момент часу. Проте у майбутньому з розвитком даної технології в неї є великий потенціал стати

найкращим варіантом з усіх. Що надасть можливість використати її в даному завданні наприклад у вигляді схеми з розділенням випромінення на два потоки, кожен з яких потрапляє на свою матрицю встановлених під $22,5^\circ$ відносно один одного, що дасть 8 положень поляризаторів.

2.2 Перекриття верхньої полусфери

В даному підрозділі будуть розглянуті методи огляду верхньої полусфери та можливі шляхи реалізації. Для покращення розуміння, схеми будуть розглянуті на плоскій проєкції полусфери, де центр кола є знітом, тобто найвищою точкою полусфери, а краї нижньою границею оглядової зони, як це показано для прикладу на пустій схемі (рис. 2.9).

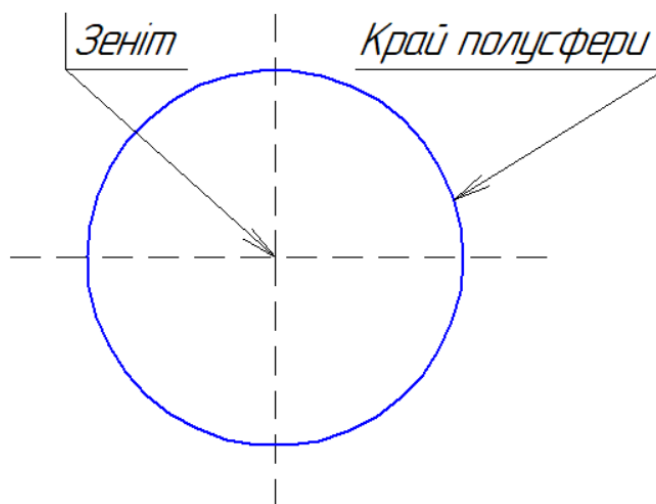


Рисунок 2.9 – Пуста схема верхньої полусфери

Для більшості випадків в системах з зміщенням поля зору, можна використовувати системи з зеркал, що треба враховувати у розрахунках.

2.2.1 Схема зі стаціонарних камер, що перекривають всю полусферу

Найпростіша схема, яка представляє з себе комплекс камер, які встановлюються з невеликим перекриттям поля зору один одного для створення одного неперервного зображення (рис. 2.10). З практичної точки зору це виглядає як декілька за кільцьованих рядів камер один над одним з зміщенням кута постанови для кожного наступного ряду. В даній схемі є 3 типи та 2 порядки побудови.

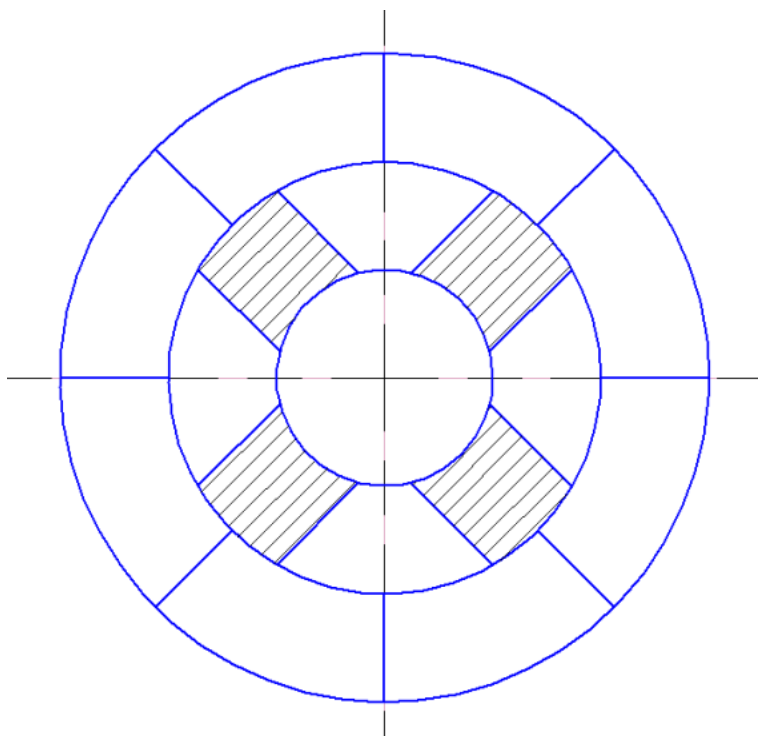


Рисунок 2.10 – Схема стаціонарних рядів камер, що стоять один над одним, штриховка – перекриття полів зору

Типи розрізняються за встановленням рядів, а саме рівно один над одним, із зміщенням на 45° (рис. 2.11) або спіраллю. Таке зміщення перш за все дозволяє частково перекривати поле зору не однієї камери зверху та знизу, а по половині двох камер, що закриває невеличкі сліпі зони між кутами полів зору у випадку неможливості встановлення камер достатньо щільно для перекриття полів один

одного. Друга перевага це можливість, як правило, встановити камери щільніше один до одного. Побудова спіраллю представляє собою плавне переходження одного ряду в інший. В такому варіанті побудови максимально зберігається простір, що дає можливість зробити схему максимально компактною, але прийдеться також враховувати, що положення камер відрізняється один від одного не лише по горизонталі, а й по вертикалі.

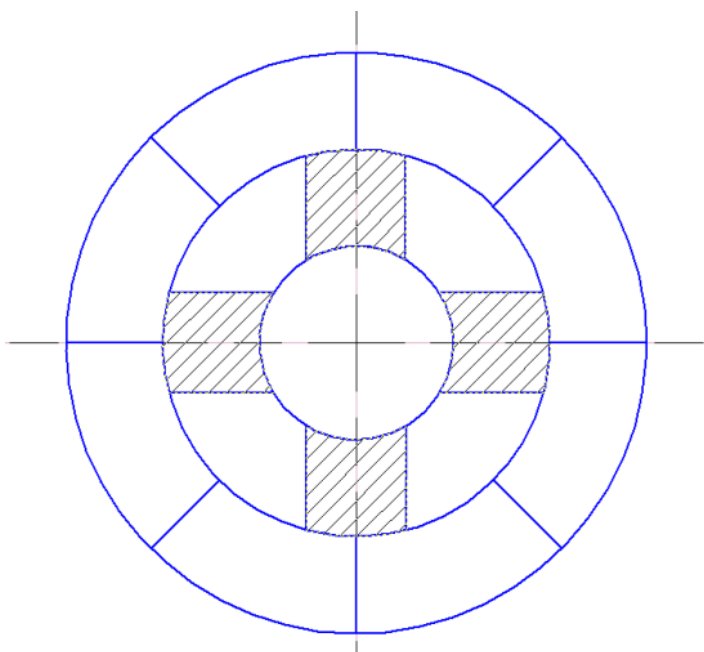


Рисунок 2.11 – Схема стаціонарних рядів камер, що стоять один над одним з зміщенням 45° , штриховка – перекриття полів зору

Порядок побудови може йти зверху вниз та знизу верх. Головна різниця між типами побудови, це перекриття зеніту схеми. При побудові зверху вниз зеніт може перекриватися однією камерою і закриття решти простору вибудовується в залежності від камери зеніту. В той час, як при побудові знизу верх є ймовірність того, що зеніт потрібно буде закривати двома камерами встановленими від куту один до одного.

Дана схема є дуже надійною, бо не залишає суттєвих сліпих зон та надає безперервний нагляд за усією напівсферою. Проте така схема є найдорожчою, бо камери є найдорожчою складовою будь якої схеми.

2.2.2 Сканування простору одним рядом камер

Ця схема представляє один ряд камер, в якому камери повертаються оглядаючи простір зверху вниз та навпаки (рис. 2.13). В залежності від задачі можна рухати камери безперервно або встановлюючи у певне положення на певний період часу. Для випадку з наявністю поляризатора знадобиться варіант з певними положеннями через необхідність знімати на кожній позиції певну кількість положень поляризатора, також це означає у даному випадку, що під час переміщення камер корисна інформація буде втрачена, якщо поляризатор в камері не зафіксований у певному положенні.

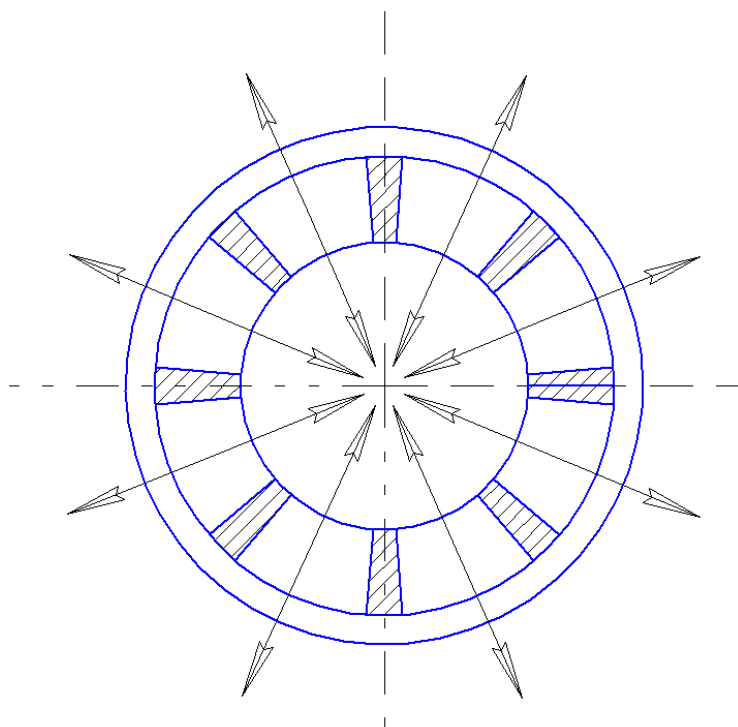


Рисунок 2.13 – Схема сканування одним рядом, штриховка – перекриття полів зору

Дана проблема буде актуальна для всіх схем з переміщенням камери з поляризатором. Єдина можливість цьому запобігти, використовувати схеми з фіксованими поляризаторами.

Головною проблемою даного методу є сліпа зона в зеніті, якщо немає можливості повертати камери на достатній кут, що приведе до необхідності встановлення окремої камери для зеніту.

Іншою проблемою є наявність сліпих зон, якщо задача полягає у спостереження простору та виявлення об'єктів. Для зменшення цієї проблеми, треба зменшити сліпі зони чи підвищити швидкість з якою її перевіряють час від часу. Для даної схеми є варіант додавання нових рядів камер, що зменшить як сліпі зони, так і час їх перевірки.

Ця схема гарно підходить для нагляду за середовищем в якому є прогнозовані події, об'єкти, тощо. Особливо якщо зробити рух камер незалежним одним від одного.

2.2.3 Сканування простору стовпцем з камер

Схема представляє серію камер встановлених один над одною, що обертається (рис. 2.14). Перш за все необхідно відмітити, що для даної схеми необхідна окрема камера для зеніту або врахувати повертання зенітної камери, якщо вона входить у склад схеми. Окрім проблеми з камерою зеніту, також є проблема сліпої зони, яка більша за ту, що була у минулій схемі. Цю проблему можна зменшити додаванням нових стовпів камер. Так 1 додатковий стовп покращить нагляд в 2 рази, а 3 стовпи в 4 завдяки тому, що при обертанні для отримання повної інформації необхідно зробити пів обороту та четверть відповідно. До того ж площа сліпої зони зменшується у кількість полів зору встановлених додаткових камер. Це покращення можна використовувати й по іншому, при наявності 2 або чотирьох стовбців, можна зробити

рух не по колу, а один одному на зустріч. Такий варіант працює як капкан, бо не залишає вікон в яких шукана ціль може залишатися при виконання певних вимог, проте така схема має й недолік, який полягає в тому, що сліпі зони залишаються без нагляду вдвічі більше ніж при обертанні в одну сторону, бо камері для огляду однієї зони прийдеться пройти відстань вдвічі більше.

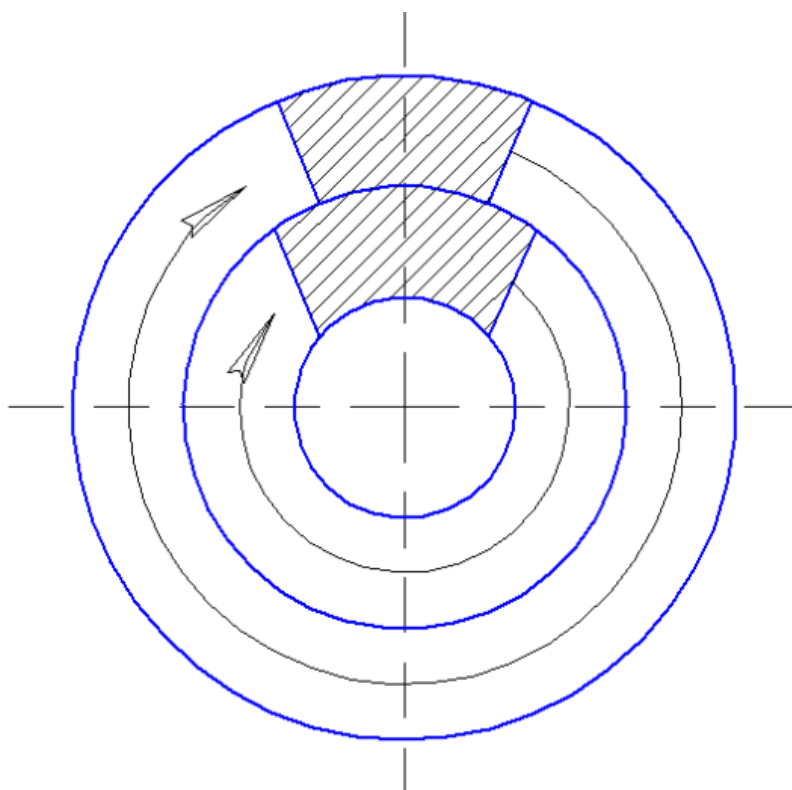


Рисунок 2.14 – Схема сканування простору стовпцем з камер, штриховка – стовпець камер

Як варіант побудови, можна розташовувати камери зі зміщенням в сторони (рис 2.15). Так за допомогою алгоритмів можна приблизно передбачити стан сліпих зон. При поєднанні таких косих протилежних стовпів, можна створити схему, в якій всі або майже всі сліпі зони будуть прогнозовані.

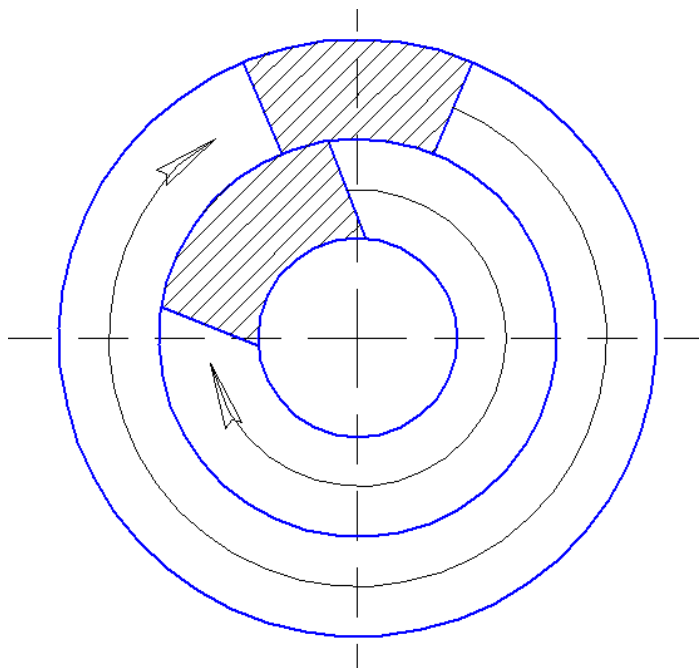


Рисунок 2.15 – Схема сканування простору стовпцем з камер посунутих на 45° , штриховка – стовпець камер

Дана схема гарно підходить для створення фотометричних карт та не термінового періодичного сканування. Також ця схема гарно працює в ситуації коли необхідно оглядати певний кутовий простір, при встановлені двох стовпців, що сходяться та розходяться система починає працювати як капкан від якого неможливо сховатися.

2.2.4 Система патрулювання однією чи декількома камерами

Система полягає в проходженні камери або кількох камер по одному або кількох маршрутів по полу-сфері, які зачеплять своїми полями зору кожен куток полу-сфери. Таких маршрутів безліч, але з усіх можна виділити декілька найпопулярніших, а саме прямокутне (рис 2.16), трикутне (рис 2.17), спіральне (рис 2.18), ступінчате (рис. 2.19) і гармонічне (рис 2.19) сканування.

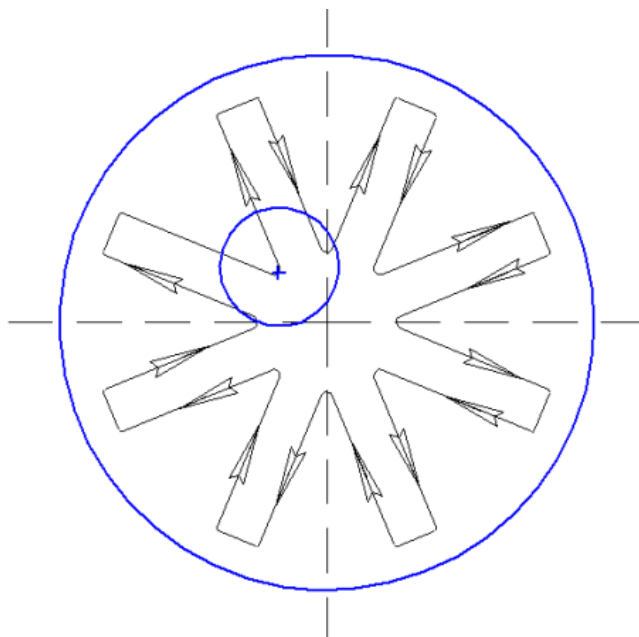


Рисунок 2.16 – Схема сканування по прямокутному шляху

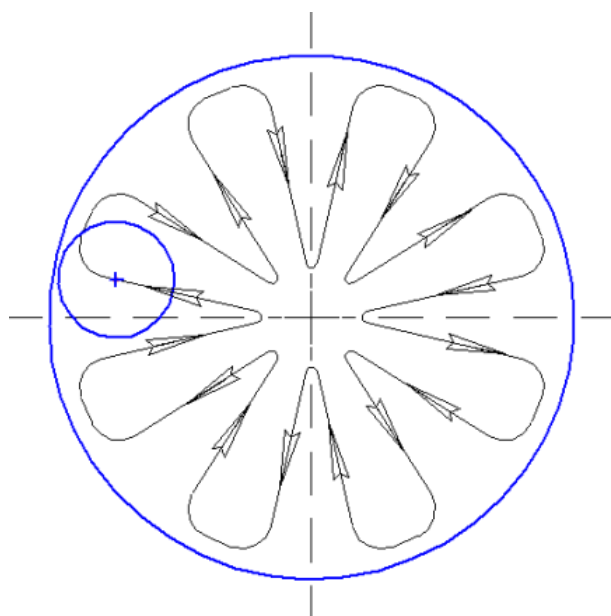


Рисунок 2.17 – Схема сканування по трикутному шляху

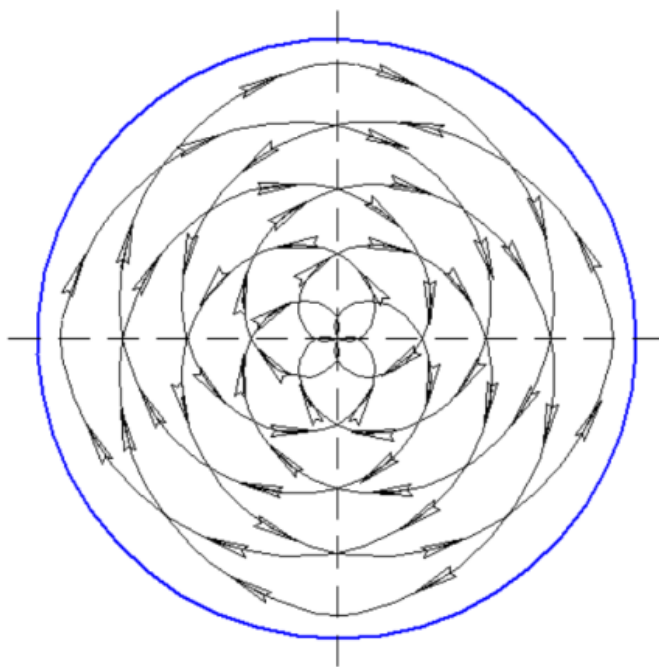


Рисунок 2.18 – Схема сканування по спіральному шляху

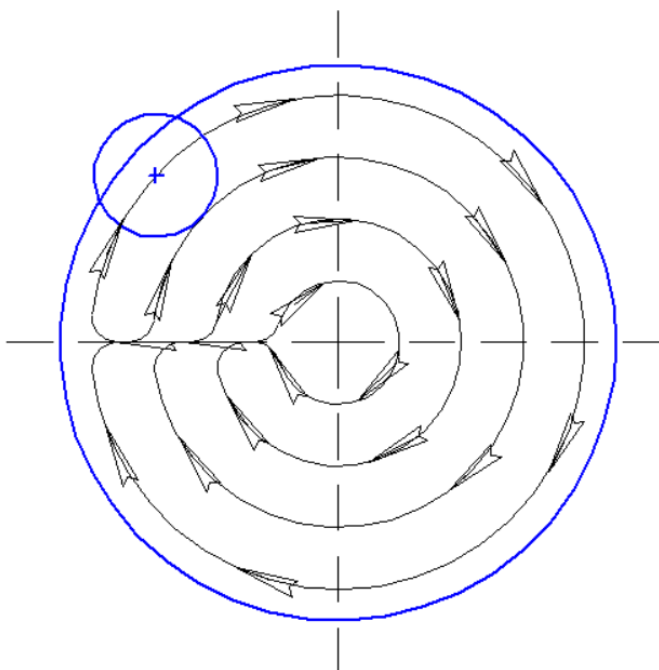


Рисунок 2.19 – Схема сканування по ступінчастому шляху

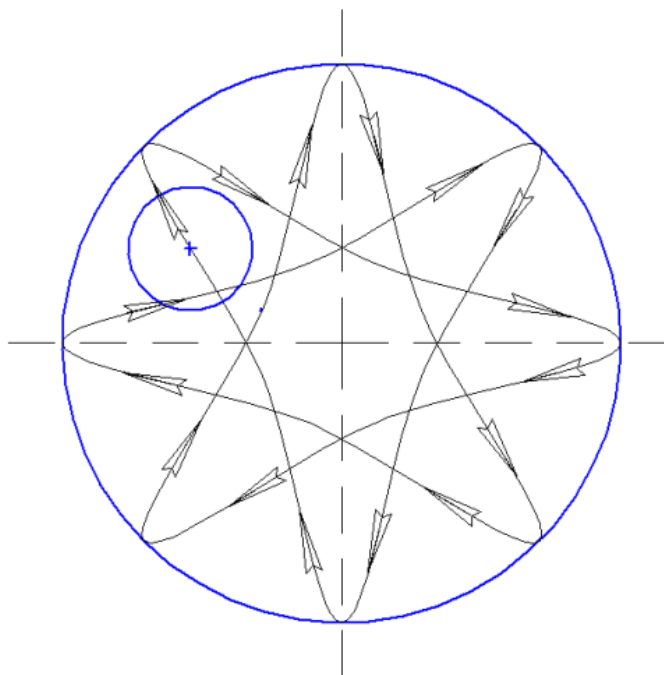


Рисунок 2.20 – Схема сканування по гармонічному шляху

Для зменшення шляху для повного кола та пришвидшення сканування можна встановити додаткові шляхи, найпростішими варіантом є розтягнення існуючого шляху в двічі та його віддзеркалення. Для деяких шляхів достатньо змістити існуючий шлях, такий як синусоїда, щоб вийшла косинусоїда.

Як і з іншими схемами в даній є проблема з сліпими зонами, але на відміну від інших ситуацію можна покращити додаванням меншої кількості камер, через можливість виставити шлях таким чином, щоб оновлення інформації про сліпу зону було дуже швидким, а ключові точки перевірялися частіше інших. Так якщо по двом шляхам відправити по 4 камери на зустріч один одному зі зміщенням в чверть інтервалу, то можна перевіряти ключові точки 8 разів за одне коло і по 4 рази вторинні.

Дана схема часто використовується для патрулювання певної території та перевірки кількох точок з певним інтервалом часу, або система орієнтування за сонцем.

2.2.5 Розширення поля зору лінзою типу рибне око

Схема представляє одну чи декілька камер, поля зору яких значно розширенні встановленими перед ними лінзами риб'ячого ока. Перш за все така схема є прямим втручанням у первину оптичну схему, що порушує усі початкові характеристики схеми, тож якщо схема для цього не призначена, нічого не буде працювати. По друге, суть риб'ячого ока у цілеспрямованому підвищенню дисторсії, що значно спотворює зображення по краях поля зору дуже сильно його стискаючи, що значить, що просторова роздільна здатність суттєво відрізняється у центрі та по краях зображення, що призводить до неможливості розрізнити об'єкти на краях зображення, які можливо розрізнити у центрі зображення і навпаки. Така схема підходить для не вимогливих задач нагляду за великою територією.

2.3 Висновки до розділу 2

З другого розділу видно, що варіантів побудов схем системи та схем перекриття в верхньої полусфери досить багато.

Кожна з схем побудови оптичної системи з поляризатором мають проблеми у реалізації, через нестаток положень поляризатора або необхідність тим чи іншим способом обертати поляризатор, що призводить до розмиття та часткової втрати випромінення поляризованим під певним кутом. В результаті кращими схемами є схема з поляризатором, що постійно обертається або з поляризатором, що обертається ривками.

Проте більшість з схем покриття верхньої полусфери мають проблеми конкретно з реалізацією в системах з поляризацією, через необхідність рухати зображення, що з урахуванням необхідності часу для формування зображення для кожного положення поляризатору, приблизно 1 секунда, для схем з нефіксованими

поляризаторами, значно збільшує час необхідний для огляду повної полусфери один раз, що робить вікна між перевірками сліпих зон недопустимо великими. Тож кращою схемою для систем з поляризатором буде схема зі стаціонарних камер, що перекривають всю полусферу.

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА РОЗРАХУНКИ

3.1 Математична модель

У даному підрозділі буде розглянута фізичні складові, їх зв'язки між собою та елементи які можна буде обрахувати при необхідності.

Розділ складається з окремих частин, які відповідають характеристикам в них описаним:

1. Енергетичні параметри
2. Поляризація
3. Сигнали та їх відношення

3.1.1 Енергетичні характеристики

Перш за все для оцінки сигналів, необхідно його отримати з енергетичних величин випромінення, яке пов'язане з об'єктом та фоном від якого воно надходить. У цьому підрозділі будуть розглянуті основні енергетичні характеристики, а саме випромінення M , яскравість L та потік випромінення Φ .

3.1.1.1 Закони теплового випромінювання

Чорне тіло є ідеальним випромінювачем і поглиначом, при цьому коефіцієнти поглинання (α) і випромінювання (ϵ) дорівнюють одиниці. Його спектральна випромінювання є максимальним для будь-якого теплового джерела при певній температурі. Багато джерел у реальному світі мають спектральні характеристики, близькі до характеристик чорного тіла [20].

Спектральне випромінювання чорного тіла як функція температури та довжини хвилі визначається законом випромінювання Планка:

$$M_{bb}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \left(\frac{W}{cm^2} - \mu m \right),$$

де C_1 - перша константа випромінювання ($3,7415 \times 10^4$ Вт мкм⁴/см²)

C_2 - друга константа випромінювання ($1,4388 \times 10^4$ мкК)

T - абсолютна температура (К)

λ - довжина хвилі (м)

Спектральна радіаційна випромінювання пов'язана зі спектральною випромінюванням таким чином:

$$M_{bb}(\lambda, T) = L_{bb}(\lambda, T) \Omega,$$

де Ω – тілесний кут, наведений детектором на випромінювачі.

Випромінювання отримують шляхом інтегрування спектрального випромінювання в діапазоні хвиль, що цікавить. Для смуги 3-5 мкм радіаційне збудження визначається як:

$$M_{bb}(T) = \int_3^5 \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} d\lambda$$

Спектральний випромінювання нечорного тіла визначається як:

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) M_{bb}(\lambda, T),$$

де $\varepsilon(\lambda, T)$ – спектральна випромінювальна здатність зі значенням, меншим за одиницю. Сіре тіло - це матеріал, випромінювальна здатність якого не залежить від довжини хвилі в діапазоні хвиль, що цікавить.

Довжина хвилі, на якій виникає максимальне випромінювання для даної температури тіла, стає коротшою з підвищенням температури. Довжина хвилі, що відповідає піковому випромінюванню, одержується диференціюванням рівняння Планка та розв'язуванням максимуму. Пікова довжина хвилі визначається законом Відня зміщення:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} (\mu m),$$

де T – температура тіла в Кельвінах.

Повний радіаційний випромінювання отримується шляхом інтегрування рівняння Планка по всьому спектру. Результат дає закон Стефана-Больцмана:

$$M_{bb} = \sigma T^4 \left(\frac{W}{cm^2} \right), \quad (3.1)$$

де σ – постійна Стефана Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-12} \frac{Дж}{cm^2 K}$)

T – температура (K)

Для нечорного тіла загальне випромінювання змінюється так:

$$M_{bb} = \varepsilon \sigma T^4 \left(\frac{W}{cm^2} \right), \quad (3.2)$$

де ε – ефективна випромінювальна здатність джерела, що не є чорним тілом.

3.1.1.2 Енергетична яскравість

Енергетична яскравість (яскравість випромінювання) - відношення потоку випромінювання, що переноситься в елементарному пучку променів, що проходить через дану площадку і поширюється в тілесному куті $\delta\Omega$, що містить даний напрямок, до площі проекції цього майданчика на площину, перпендикулярне напрямку поширення [21]:

$$L_e = \frac{dI}{dQ \cos \theta} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}} \right), \quad (3.3)$$

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA_\perp d\Omega} = \frac{d^2\Phi_e}{dA_\perp \cos \theta d\Omega} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}} \right),$$

де θ – кут між нормаллю до випромінюючого майданчика і розглянутим напрямом

dA – площа площадки

$dA_\perp$ – площа проєкція

Існує також хвильова та частотна спектральна енергетична яскравість:

$$L_{e\lambda} = \frac{d^3\Phi_e}{dA_\perp d\Omega d\lambda}$$

$$L_{e\nu} = \frac{d^3\Phi_e}{dA_\perp d\Omega d\nu}$$

При цьому $L_e = \int L_{e\lambda} d\lambda = \int L_{e\nu} d\nu$

Інтегрування енергетичної яскравості по кутам простору демонструє відповідно повну, хвильову та частотну енергетичну світимість:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} = \int L_e \cos \theta d\Omega = \iint L_e \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi,$$

$$M_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{dA d\lambda} = \int L_{e\lambda} \cos \theta d\Omega,$$

$$M_{ev} = \frac{d\Phi_e}{dA dv} = \int L_{ev} \cos \theta d\Omega,$$

де $\theta = 0 \dots \frac{\pi}{2}$, а $\varphi = 0 \dots 2\pi$

Закон Ламберта строго виконується тільки для ідеально розсіюючих або ідеально поглинаючих поверхонь. Але наближено йому підпорядковуються й інші випромінювачі: розжарені тіла, люмінесцентні сфери тощо. При цьому відхилення від закону істотне лише за великих значень θ , тобто у напрямках, близьких до дотичних до випромінюючої поверхні. Для джерел, підпорядкованих закону Ламберта:

$$M_e = \pi L_e$$

$$M_{e\lambda} = \pi L_{e\lambda} \quad (3.4)$$

$$M_{ev} = \pi L_{ev}$$

3.1.1.3 Потік випромінювання

Потік випромінювання – це величина для вираження кількості випромінювання [22].

Світловий потік – це величина для вираження кількості світла через зорове відчуття.

Потік випромінювання Φ_e - це потік променевої енергії Q_e , що проходить через дану точку за одиничний проміжок часу:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \text{ (Вт)}$$

Оскільки яскравість багатьох випромінювачів можна прийняти незалежними від напрямлення, що підлягає закону Ламберта, тобто в формулі (3.3):

$$dI = dI_0 \cos \theta, \quad (3.5)$$

Враховуючі формулу (3.3), де dI дорівнює (3.5) та безкінечно малий кут $d\Omega$, який дорівнює:

$$d\Omega = 2\pi \sin \sigma d\sigma,$$

отримаємо, що потік від поверхні dQ в межах $d\Omega$ буде дорівнювати:

$$d^2\Phi_e = L_e dQ \cos \sigma = 2\pi L_e Q \sin \sigma \cos \sigma d\sigma$$

Звідси повний потік випромінювання, для напрямку по осі та під кутом:

$$d\Phi_e = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d^2\Phi_e = \pi L_e dQ \quad (3.6)$$

$$d\Phi_e = \pi L_e dQ \sin^2 \sigma$$

Для потоку, що пройшов через систему також необхідно врахувати коефіцієнти пропускання системи та допоміжних елементів:

$$d\Phi'_e = \tau\pi L_e dQ \quad (3.7)$$

$$d\Phi'_e = \tau\pi L_e dQ \sin^2 \sigma,$$

де τ – коефіцієнт пропускання оптичної системи, який дорівнює добутку коефіцієнтів пропускання окремих елементів системи.

3.1.2 Поляризація

Оскільки одним із елементів системи буде поляризатор, то необхідно розуміти які можливості надасть його наявність в системі окрім контрасту, який розглядається у даній роботі. У даному підрозділі будуть розглянуті різні властивості поляризатора та можливості його використання, для подальшого покращення системи та отримання додаткової інформації.

3.1.2.1 Поляризаційні характеристики

Поляризація хвилі - просторова орієнтація хвилі. Хвилю, в якій напрям коливання вектора E впорядковане якимось чином, називають поляризованою.

Інфрачервоне випромінювання поширюється через ізотропне середовище у вигляді поперечних електромагнітних (ТЕМ) хвиль, які містять ортогональні електричні та магнітні поля в площині, перпендикулярній напрямку поширення. Змінний у часі вектор електричного поля, $E(z,t)$, можна розкласти на 2 ортогональні компоненти [23, 24]:

$$E_x(z, t) = E_{ox}(t) \cos(kz - \omega t - \delta_x(t))$$

$$E_y(z, t) = E_{oy}(t) \cos(kz - \omega t - \delta_y(t)),$$

де E_{ox} та E_{oy} — амплітуди електричного поля, а δ_x та δ_y — фази компонентів електричного поля.

Характер зміни результуючого вектора електричного поля описується фігурним рівнянням Ліссажу:

$$\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 - \left(\frac{2E_x E_y}{E_{ox} E_{oy}}\right) \cos \delta = \sin^2 \delta,$$

де $\delta = \delta_x - \delta_y$ — різниця фаз між двома компонентами електричного поля.

Кут поляризації ψ — це кут між великою віссю еліпса та горизонталлю. Він пов'язаний з компонентами електричного поля таким виразом:

$$\tan 2\psi = \frac{2E_{ox}E_{oy} \cos \delta}{E_{ox}^2 + E_{oy}^2}, \text{ де } 0 < \psi < \pi$$

Кут еліптичності χ визначається:

$$\tan \chi = \frac{\pm b}{a}, \text{ де } -\frac{\pi}{2} < \chi < \frac{\pi}{2}$$

$$\sin 2\psi = \frac{2E_{ox}E_{oy} \sin \delta}{E_{ox}^2 + E_{oy}^2}$$

Хвилі, залежно від виду поляризації, поділяють на [25]:

- неполяризовані
- лінійно- / плоско-поляризовані
- еліптично-поляризовані

- частково-поляризовані

Хвилі у яких коливання вектора E відбуваються тільки в одній площині, що проходить через промінь, називається лінійно- / плоско-поляризованими хвилями. Площина, в якій коливається вектор E , називають площиною поляризації. Лінійна поляризація виникає, коли різниця фаз δ становить 0° або 180° . Підставляючи $\delta=0^\circ$ у рівняння, можна отримати геометричне місце змінного у часі електричного поля у вигляді прямої:

$$\frac{E_x}{E_{0x}} = \frac{E_y}{E_{0y}}$$

На малюнку показана фігура Ліссажу для лінійно поляризованого світла. Аналогічна підстановка в рівняння показує, що кут поляризації ψ для лінійно поляризованого світла є нахилом прямої:

$$\tan \psi = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}$$

Нахил позитивний, якщо різниця фаз δ дорівнює 0° , і негативний, якщо δ дорівнює 180° (рис. 3.1). Для лінійно поляризованого світла кут еліптичності χ дорівнює нулю.

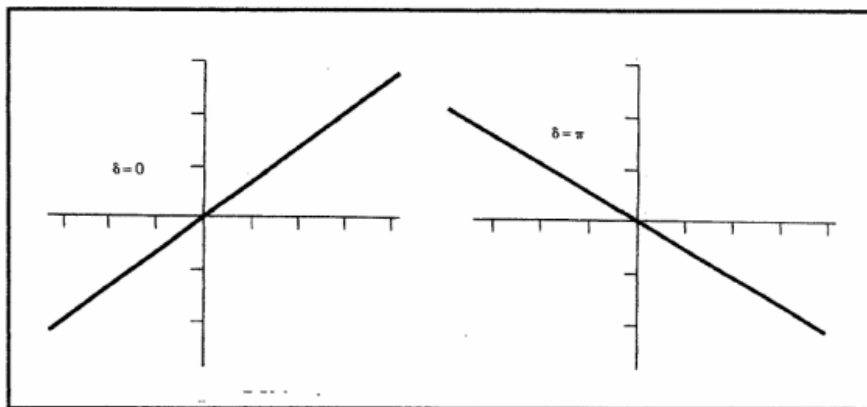


Рисунок 3.1 - Фігура Ліссажу для лінійно поляризованого світла [26]

Хвилі в яких вектор E обертається навколо вектору поширення хвилі одночасно з цим змінюючись періодично по модулю називається еліптично-поляризована хвиля. Кінець такого вектора описує еліпс. Якщо обертання описує коло, то така хвиля називається поляризованою по колу хвилею.

Кругова поляризація виникає, коли різниця фаз δ становить $\pm 90^\circ$, а амплітуди складових електричного поля однакові. Підставлення $\delta = \pm 90^\circ$ і $E_{ox} = E_{oy} = E_o$ в рівняння дає рівняння кола радіусом E_o .

$$\left(\frac{E_x}{E_o}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_o}\right)^2 = 1$$

На малюнку показана фігура Ліссажу для світла з круговою поляризацією (рис. 3.2). Для $\delta = +90^\circ$ результуючий вектор поля обертається за годинниковою стрілкою, і світло описується як поляризоване зліва по колу. Якщо $\delta = -90^\circ$, результуючий вектор поля обертається проти годинникової стрілки, і світло поляризується по правому колу. Кут поляризації ψ дорівнює нулю, а кут еліптичності χ дорівнює 45° .

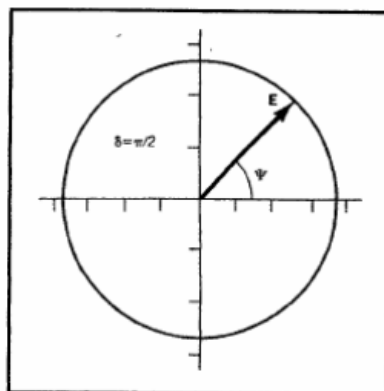


Рисунок 3.2 - Фігура Ліссажу для циркулярно поляризованого світла [26]

Найбільш загальним виглядом поляризованої хвилі, що при певних умовах переходить у лінійно поляризовану або поляризовану по колу хвилю називають еліптично-поляризованою (рис. 3.3). Еліптично поляризована хвиля може бути розкладена на дві перпендикулярні відносно друг друга лінійно-поляризовані хвилі. Різниця фаз цих хвиль зберігається на протязі всього часу, тобто являються когерентними.

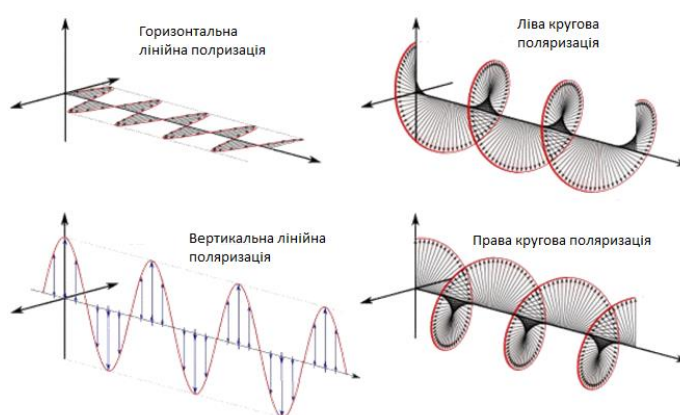


Рисунок 3.3 - Лінійно та еліптично/кругова поляризовані хвилі [27]

Для розгляду частково-поляризованої хвилі потрібно знати про природні хвилі. Природні хвилі – поперечні хвилі, що не виявляють асиметрії по відношенню до напрямку поширення (рис. 3.4). Коливання вектора E в будь-якій точці середовища відбуваються в різних напрямках з швидкою неконтрольованою зміною один одного.

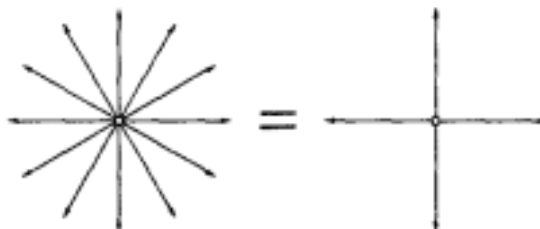


Рисунок 3.4 – Розподіл напрямку поляризації у природньому випромінюванні [25]

Частково-поляризовані хвилі виглядають як накладені дві взаємно перпендикулярні некогерентні плоскополяризовані хвилі, проте з різними за інтенсивністю, або як сума природних і плоскополяризованих складових (Рис. 1.6). Частково поляризовані хвилі характеризуються ступенем поляризації P , яку визначають як

$$P = \frac{I_{\text{макс}} - I_{\text{мін}}}{I_{\text{макс}} + I_{\text{мін}}} = \frac{I_{\text{пол}}}{I_0}$$

Тут $I_{\text{пол}}$ – інтенсивність поляризованої складової,

I_0 – повна інтенсивність частково-поляризованого світла (рис 3.5):

$$I_0 = I_{\text{макс}} + I_{\text{мін}}.$$

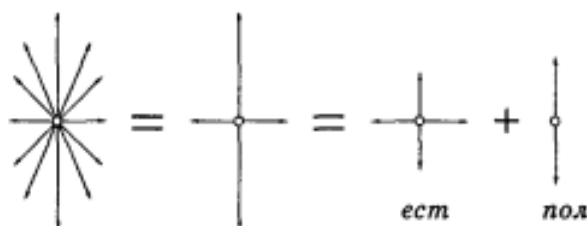


Рисунок 3.5 - Частково поляризовані хвилі [25]

3.1.2.2 Поляризація відбиття та випромінювання

Енергія, зібрана тепловізійною камерою від сцени, містить як відбите, так і випромінене випромінювання. Обидва компоненти зазвичай частково поляризовані. Для інфрачервоних хвиль, де холодне небо є основним фактором відбивного компонента, поверхнєве випромінювання має тенденцію домінувати в сигнатурі та стані поляризації. Таким чином, поляризація випромінюваного випромінювання становить більший (але не виключний) інтерес для дистанційного зондування.

3.1.2.2.1 Поляризація відбиття

Коефіцієнт відбиття для паралельного ($R_B \parallel B$) і перпендикулярного ($R_B \perp B$) поляризованого випромінювання визначається рівняннями Френеля [28]. З точки зору датчика, паралельні та перпендикулярні компоненти відповідають горизонтальній та вертикальній поляризаціям відповідно.

$$R_{\parallel} = \left| \frac{E_r^{\parallel}}{E_i^{\parallel}} \right|^2 = \left| \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right|^2$$

$$R_{\perp} = \left| \frac{E_r^{\perp}}{E_i^{\perp}} \right|^2 = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right|^2$$

де n_1 - показник заломлення повітря ($n_1=1$)

n_2 - комплексний показник заломлення металу

θ_i - кут падіння

θ_t - переданий кут

Заломлення випромінювання на межі розділу також підпорядковується закону Снелла:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

Ступінь поляризації відображення DOP_r визначається як:

$$DOP_r(\theta_r) = \left| \frac{R_{||}(\theta_r) - R_{\perp}(\theta_r)}{R_{||}(\theta_r) + R_{\perp}(\theta_r)} \right|$$

При відбитті природної хвилі від поверхні, хвиля частково поляризується. Відбивна здатність при нормальному куті огляду становить близько 60%. При косих кутах перпендикулярно поляризована складова вища за паралельну. Паралельний компонент має мінімальне, але відмінне від нуля значення, приблизно на 80° (основний кут падіння). Ступінь поляризації досягає пікового значення 80% під основним кутом.

Відбивна здатність паралельного компонента ($R_B \parallel B$) дорівнює нулю під кутом Брюстера, а відбите випромінювання є 100% перпендикулярно поляризованим. Кут Брюстера $\vartheta_{\text{бр}}$, відповідає таким вимогам (рис. 3.6):

$$\tan \vartheta_{\text{бр}} = \frac{n_2}{n_1}$$

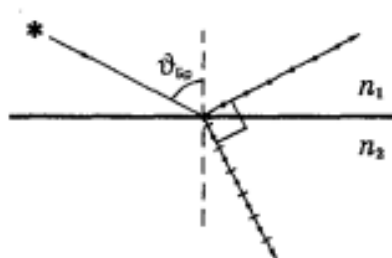


Рисунок 3.6 - Кут Брюстера [25]

3.1.2.2.2 Поляризація випромінення

Експерименти Міллікена показали, що високий ступінь поляризації випромінювання, що випромінюється від розжареного тіла досягається з металами. Найвищий ступінь поляризації був отриманий на гладких поверхнях і під великим косим кутом від нормалі. Неметалічні, прозорі та непрозорі об'єкти давали слабку поляризацію. Пояснення спостережуваної поляризації включало заломлення випромінювання, що випромінюється зсередини об'єкта на межі розділу [29].

Відповідно до закону Кірхгофа, випромінювальна здатність пропорційна поглинальній здатності $\alpha(\lambda)$, яка пов'язана з відбивною здатністю $R(\lambda)$, як:

$$\alpha(\lambda) = 1 - R(\lambda)$$

Теплове випромінювання, що випромінюється (E_t) від поверхні розділу частково поляризовано, при цьому більш сильні компоненти електричного поля орієнтовані паралельно площині випромінювання (горизонтальна площина x-y), тобто горизонтально поляризовані.

Застосовуючи закон Кірхгофа та рівняння Френеля, коефіцієнти випромінювання для випромінювання, поляризованого паралельно ($\varepsilon_{\parallel} \parallel \mathbf{B}$) і перпендикулярно ($\varepsilon_{\perp} \perp \mathbf{B}$) до площини випромінювання, визначаються.

$$\varepsilon_{\parallel} = \left| \frac{E_t^{\parallel}}{E_i^{\parallel}} \right|^2 = \frac{4n_2 \cos \theta_t}{\cos^2 \theta_t + 2n_2 \cos \theta_t + n_2^2 + k_2^2}$$

$$\varepsilon_{\perp} = \left| \frac{E_t^{\perp}}{E_i^{\perp}} \right|^2 = \frac{4n_2 \cos \theta_t}{(n_2^2 + k_2^2) \cos^2 \theta_t + 2n_2 \cos \theta_t + 1}$$

Загальна випромінювальна здатність — це середнє значення паралельної та перпендикулярної складових.

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp})$$

Ступінь поляризації випромінювання (DOP_e) визначається як:

$$DOP_e(\theta_t) = \left| \frac{\varepsilon_{\parallel}(\theta_t) - \varepsilon_{\perp}(\theta_t)}{\varepsilon_{\parallel}(\theta_t) + \varepsilon_{\perp}(\theta_t)} \right|$$

Плоско-поляризовані хвилі можна отримати з природних хвиль за допомогою поляризаторів. Поляризатори вільно пропускають коливання світлового вектора, паралельні площині поляризації поляризатора, перпендикулярні навпаки затримуються повністю або частково. При повній затримці поляризатор є ідеальним.

Для керування зміною різниці фаз хвилі використовують компенсатор та пластинки в чверть та половину хвилі (рис 3.7). Це дозволяє змінювати характеристики поляризації та переводити один вид поляризації в інший (рис 3.8).



Рисунок 3.7 - Зміна поляризації хвилі при зміні фази [25]

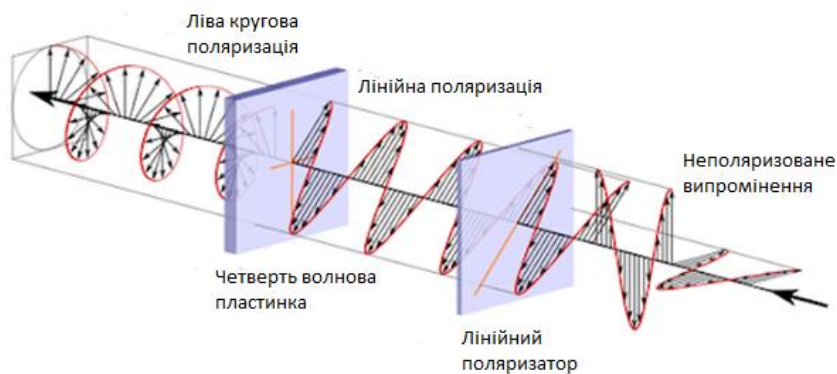


Рисунок 3.8 – Приклад роботи лінійного поляризатора та чверть волнової пластинки [30]

Поляризатори також можуть виступати у вигляді аналізаторів, щоб визначати характер і ступень поляризації хвиль. Для цього використовують закон Малюса:

$$I = kI_0 \cos^2 \varphi,$$

де I_0 – інтенсивність падаючої плоско-поляризованої хвилі,
 k – коефіцієнт пропускання поляризатора.

3.1.2.3 Вектори Стокса

Для опису поляризації плоскої монохроматичної хвилі досить трьох параметрів (рис 3.9):

- амплітуда коливань по осях X і Y відповідно E_1 та E_2
- різниця фаз δ між коливаннями по X і по Y
- піввісь еліпса E_a та E_b і кута ψ між віссю X і великою віссю еліпса (азимутального кута еліпса або азимута, інакше званого кутом нахилу еліпса).

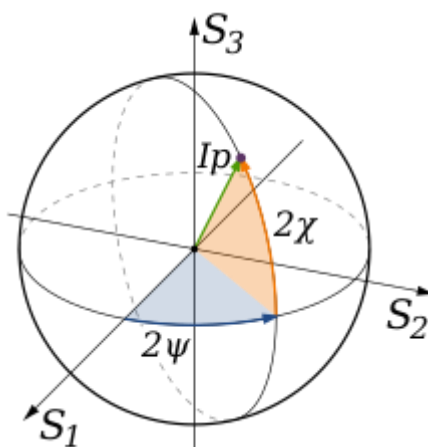


Рисунок 3.9 - Геометричне уявлення параметрів Стокса [31]

Стокс запропонував альтернативний опис поляризації за допомогою чотирьох параметрів:

$$\begin{aligned}
S_0 &= E_1^2 + E_2^2, \\
S_1 &= E_1^2 - E_2^2, \\
S_2 &= 2E_1E_2 \cos \delta, \\
S_3 &= 2E_1E_2 \sin \delta,
\end{aligned}$$

де $\delta = \delta_x - \delta_y$ – різниця фаз між двома ортогональними електричними полями.

Перший параметр S_0 є мірою загальної інтенсивності випромінювання. Другий параметр S_1 вимірює інтенсивність лінійної поляризації в горизонтальному напрямку відносно інтенсивності у вертикальному напрямку. Третій параметр S_2 вимірює інтенсивність лінійної поляризації в площині, повернутій на 45° до горизонталі відносно інтенсивності в площині 135° . Четвертий параметр S_3 пов'язаний з круговою поляризацією. S_3 не може бути зображений лінійним поляризатором.

Незалежними є тільки три з них, бо справедливо тотожність:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$$

В цьому варіанті опису поляризації плоскої монохроматичної хвилі досить знати три параметри, але не будуть відомі знаки вичислених параметрів S_1 , S_2 , S_3 .

Перші три параметри Стокса можна визначити за інтенсивністю випромінювання, поляризованого в площинах під кутами 0° , 90° і 45° до горизонталі.

$$\begin{aligned}
S_0 &= I_0 + I_{90} \\
S_1 &= I_0 - I_{90} \\
S_2 &= 2I_{45} - I_0 - I_{90}
\end{aligned}$$

Для поляриметричного теплового зображення параметри Стокса розраховуються для кожного пікселя на зображенні. Зображення інтенсивності I , ступеня поляризації DOP і кута поляризації ψ отримують з параметрів Стокса, використовуючи такі співвідношення:

$$I = S_0$$

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}$$

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right)$$

Використовуючи допоміжні кути еліптичності еліпса поляризації χ , що визначається як $\tan \chi = \pm \frac{E_b}{E_a}$, і азимут еліпса поляризації ψ , можна отримати вирази для параметрів Стокса записані в іншому вигляді:

$$S_1 = S_0 \cos 2\chi \cos 2\psi,$$

$$S_2 = S_0 \cos 2\chi \sin 2\psi,$$

$$S_3 = S_0 \sin 2\chi.$$

Ці формули характеризують поляризацію світлової хвилі наочним геометричним способом, де параметри Стокса S_1 , S_2 , S_3 інтерпретуються, як декартові координати точки, що лежить на поверхні сфери радіуса S_0 , а кути 2χ і 2ψ мають сенс у сферичних кутових координат цієї точки. Така сферична інтерпретація параметрів Стокса називається сферою Пуанкаре [32].

3.1.3 Сигнали та відношення сигнал/шум

У цьому розділі буде розглянуте отримання сигналу з енергетичних характеристик, їх нюанси та відношення сигнал/шум.

3.1.3.1 Сигнал

Під чутливістю або крутістю перетворення приймача випромінювання розуміють відношення зміни електричного сигналу на його виході до падаючого потоку. Оскільки на виході фотоприймача може змінюватися струм або напруга, розрізняють вольтову S_U та струмову S_I чутливість [33]:

$$S_U = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi} \left(\frac{\text{В}}{\text{Вт}} \text{ або } \frac{\text{В}}{\text{лк}} \right) \quad (3.8)$$

$$S_I = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi} \left(\frac{\text{А}}{\text{Вт}} \text{ або } \frac{\text{А}}{\text{лк}} \right) \quad (3.9)$$

ΔU та ΔI є показниками, які отримують при трансформації потоку, який потрапив на приймач випромінювання, тобто є отриманим сигналом, і може бути виведений з формул 3.8 та 3.9:

$$\Delta U = S_U \cdot \Delta \Phi (\text{В}) \quad (3.10)$$

$$\Delta I = S_I \cdot \Delta \Phi (\text{В})$$

3.1.3.2 Відношення сигнал/шум

Відношення сигнал/шум (SNR або S/N) - показник, що використовується в науці та техніці, який порівнює рівень бажаного сигналу до рівня фонового шуму. SNR визначається як відношення потужності сигналу до потужності шуму [34]:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}},$$

де P – середня потужність сигналу.

Потужність сигналу і шуму необхідно вимірювати в тих самих або еквівалентних точках системи і в межах однієї системи ширина смуги.

Альтернативне визначення SNR (U) - це обернена величина коефіцієнта варіації, тобто відношення середнього до стандартного відхилення сигнал або вимір:

$$U = \frac{\mu}{\sigma}, \quad (3.9)$$

де μ – середнє значення сигналу або очікуване значення сигналу,

σ – стандартне відхилення шуму або його оцінка.

Таке визначення корисне лише для змінних, які завжди невід'ємні, такі як кількість фотонів або яскравість. Він зазвичай використовується для обробки зображень, де відношення сигнал/шум зображення зазвичай обчислюється як відношення середнього значення пікселя до стандартного відхилення значень пікселів за заданою околицею.

3.2 Розрахунки за математичною моделлю

В даному підрозділі будуть проведені розрахунки на основі математичної моделі. Кінцевим результатом розрахунків буде відношення сигнал/шум, який в подальшому буде аналізуватися. У розрахунках також приведені розрахунки елементів, які необхідні для математичної моделі. Такі розрахунки будуть пояснені в процесі самого розрахунку.

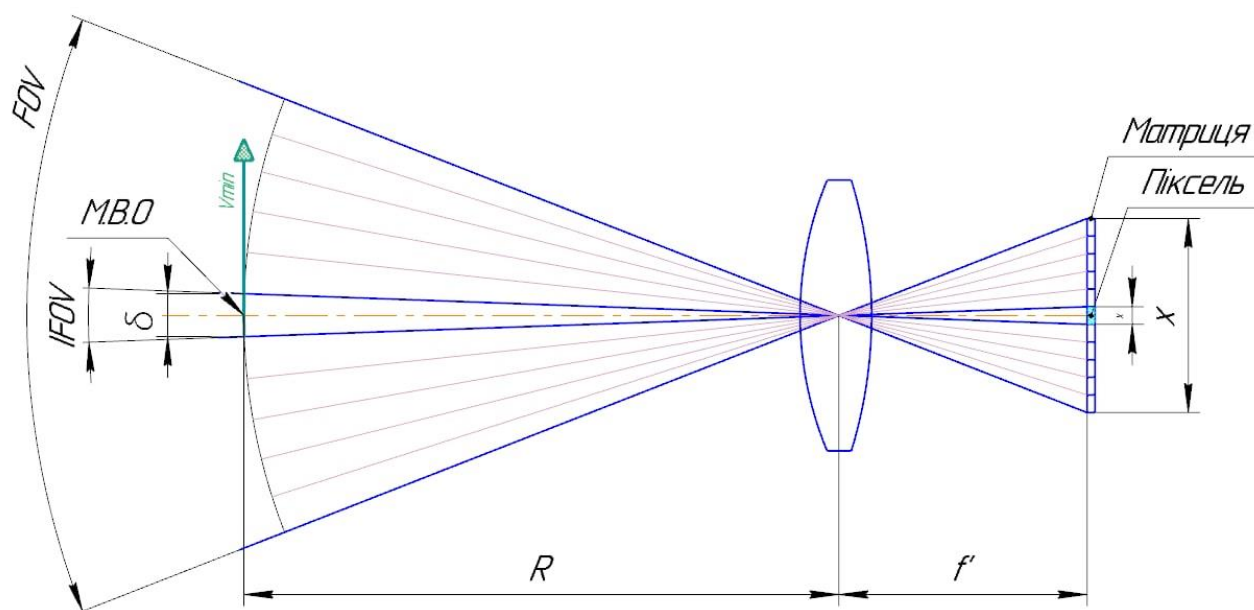
3.2.1 Геометричні розрахунки

Для математичної моделі необхідно розуміти на які параметри камери можна розраховувати без врахування енергетичних розрахунків. Для такого попереднього аналізу використаємо геометричні розрахунки, які також дозволять отримати максимальну швидкість та мінімальний розмір, які має мати об'єкт для того, щоб його можна було виявити. Так головною метою геометричних розрахунків є пошук оптимальної фокусної відстані для виявлення типових БПЛА різних класів на заданих відстанях 1000, 1500 та 2000 метрів для обраного матричного приймача ІЧ випромінювання.

Для розрахунків необхідні такі вихідні данні [35]:

- n – кількість пікселів на матриці по одній осі
- x – розмір пікселя
- X – розмір матриці, визначається як $x \cdot n$
- f' – задня фокусна відстань
- R – відстань до спостерігаемого об'єкту
- t – час формування кадру

Для кращого розуміння геометричних розрахунків використаємо базову оптичну схему з простором об'єктів і простором зображень (рис. 3.10):



M.V.O – мінімально видимий об'єкт

Рисунок 3.10 – Оптична схема

Перш за все необхідно розрахувати повне та миттєве поле зору (FOV° та $IFOV^\circ$ відповідно) системи для різних фокусних відстаней, щоб у подальшому розрахувати просторову роздільну здатність δ для всієї системи та окремого пікселя. Поля зору розраховуються за формулами:

$$FOV^\circ = 2 \tan^{-1} \left(\frac{X_n}{2f'} \right)$$

$$IFOV^\circ = \frac{FOV_n}{n}$$

З розрахованих полів зору можна визначити просторову роздільну здатність δ системи, тобто мінімальний розмір об'єкту який буде зафіксований на заданій відстані, δ розраховується за формулою:

$$\delta = IFOV \cdot R$$

З роздільної здатності системи також можна дізнатися максимальну швидкість об'єкту $\overrightarrow{V_{max}}$, яку він має мати, щоб його можна було гарантовано засікти при польоті перпендикулярно до напрямку спостереження системою, тобто швидкість за яку об'єкти пролетить відстань, що дорівнює просторовій роздільній здатності одного пікселя. Максимальна швидкість розраховується за формулою:

$$\overrightarrow{V_{max}} = \frac{\delta}{t}$$

Для даної задачі був обраний типовий мікроболометр DLD640, який має такі характеристики (Таб 3.1) [36]:

Таблиця 3.1 – Характеристики мікроболометра DLD640

Назва	DLD640
Матеріал	Аморфний кремній
Роздільна здатність	640x480 пікселів
Розмір пікселя	17 мкм
Фактор заповнення	60%
Спектральний діапазон	8-14 мкм
Температурний контроль	Термоелектричний охолоджувач ТЕС
Частота кадрів	25 Гц (одиначний), 50 Гц (парний)

Температурна чутливість NETD	$\leq 60\text{мК}$
Теплова стала часу	$\leq 5\text{мс}$
Мінімальна чутливість	$\geq 8\text{мВ/К}$
Робоча поверхня	$\geq 99\%$
Живлення	5В
Споживання	$\leq 300\text{мВт}$
Вихідні канали	Одиночний / парний аналоговий канал
Розмір без врахування ніжок	32 x 23.5 x 7.6 мм
Вага	20 грам
Робочий діапазон температур	Від -40°C до 60°C
Температура зберігання	Від -40°C до 85°C
Виконано за стандартом	MIL-STD-810 та MIL-STD-883

Для розрахунку була обрана фокусна відстань 100, 125, 150, 200, 250мм та відстань спостереження 1000, 1500, 2000 метрів.

Отримані результати розрахунків наведенні в таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 – Результати геометричного розрахунку

f' (мм)	100	125	150	200	250
FOV°	$36,72^{\circ}$	$45,93^{\circ}$	$55,12^{\circ}$	$73,51^{\circ}$	$91,9^{\circ}$
$IFOV^{\circ}$	$0,057^{\circ}$	$0,072^{\circ}$	$0,086^{\circ}$	$0,115^{\circ}$	$0,144^{\circ}$
δ_{1000} (м)	1	1,25	1,5	2	2,51

$\delta_{1500}(\text{м})$	1,5	1,87	2,25	3	3,76
$\delta_{2000}(\text{м})$	2	2,5	3	4	5
$\overrightarrow{V_{\max 1000}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$	25,04	31,3	37,58	50,12	62,65
$\overrightarrow{V_{\max 1500}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$	37,56	49,94	56,37	75,18	93,98
$\overrightarrow{V_{\max 2000}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$	50,08	62,59	75,16	100,24	125,31

Для інтерпретування результатів нам необхідні параметри швидкості та габарити типових БПЛА. Характеристики типових БПЛА для типів CR, SR, MR, LADP/LALE, які є найпоширенішими типами БПЛА наведенні у наступній таблиці 3.3:

Таблиця 3.3 – Типові БПЛА різних типів

Назва	Тип	Габарит А (м)	Габарит Б (м)	Швидкість (км/год)	Швидкість (м/сек)
РАМ	CR	1,78	2,3	70	19,44
ОРЛАН-30	SR	2,5	7,9	100	27,78
Байрактар ТВ2	MR	6,5	12	222	61,67
Сокіл 300	LADP/LALE	8,5	14	580	161,11

Порівняння швидкостей, надасть інформацію про можливість об'єкту бути не поміченим завдяки занадто великій швидкості. Порівняння габаритів надасть інформацію чи відповідає об'єкти мінімально видимому об'єкту, який може виявити система. Мінімально видимий об'єкт – об'єкт, площа якого відповідає площі просторової роздільної здатності пікселя на заданій відстані, тобто повністю заповнює 1 піксель у просторі зображення.

Обрана матриця має фактор заповнення 60%, що дає можливість виявляти об'єкти, які не заповнюють піксель повністю. Дана особливість враховується в порівнянні характеристик БПЛА та отриманих результатів розрахунків.

З отриманих даних видно, що жодна система не може засікти БПЛА типу LADP/LALE, через надзвичайно великі швидкості при таких малих розмірах, проте система з задньої фокусної відстані 125мм може розпізнавати БПЛА типів CR, SR та MR на відстані 2000м, що покриває більшу частину актуальних на даний момент БПЛА. На меншій відстані також є можливість виявляти БПЛА типи Mini. Поле зору камери складатиме 46° , чого достатньо для використання схеми перекриття верхньої полусфери з 8-ми камер з перекриттям полів зору у $0,5^\circ$ (7 пікселям) для огляду 360° навколо, та ще однієї камери для огляду зеніту. Також завдяки фактору заповнення можливо виявляти деякі з об'єктів далі ніж встановлена відстань, а також розглядати систему з фокусною відстанню 150мм, як також перспективну для подальших розрахунків.

3.2.2 Енергетичні розрахунки

Мета енергетичних розрахунків полягає у розрахунку відношення сигнал/шум для об'єкту температурою 302 К на однорідному фоні температурою 300 К, випромінення від яких проходить через систему з задньою фокусною відстанню 125 мм, згідно геометричним розрахункам. Система складається з поляризатора

діаметром 25 мм, германієвого трьох-лінзового об'єктиву та мікроболометричної матриці розмірами 10,88 на 8,16 мм, що працює в діапазоні 8-14 мкм.

Для кращого розуміння мети, розглянемо схему поширення та реєстрації випромінення (рис. 3.11). З неї видно, що до системи потрапляє випромінення з декількох джерел, а саме:

- Випромінення фону
- Відбите випромінення фону від об'єкту
- Власне випромінення об'єкту

Оскільки розрахунки проводяться у ІЧ діапазоні, відбитим випроміненням атмосфери від об'єкту можна знехтувати і працювати лише з випроміненням самого фону та об'єкту.

На схемі також відмічені ключові точки в яких параметр потоку випромінення найбільш цікавий, а саме:

- Безпосередньо потік випромінення об'єкта та фону
- Потік випромінення на момент знаходження перед вхідною зіницею системи, у даному випадку перед поляризатором
- Стан потоку випромінення після проходження через поляризатор у трьох випадках (загалом та при наявності часткової поляризації у двох положеннях поляризатора, коли співпадає з віссю поляризації та перпендикулярно до віссі поляризації)
- Потік випромінення, який пройшло через систему та потрапив на приймач для кожного з випадків вказаних у пункті вище

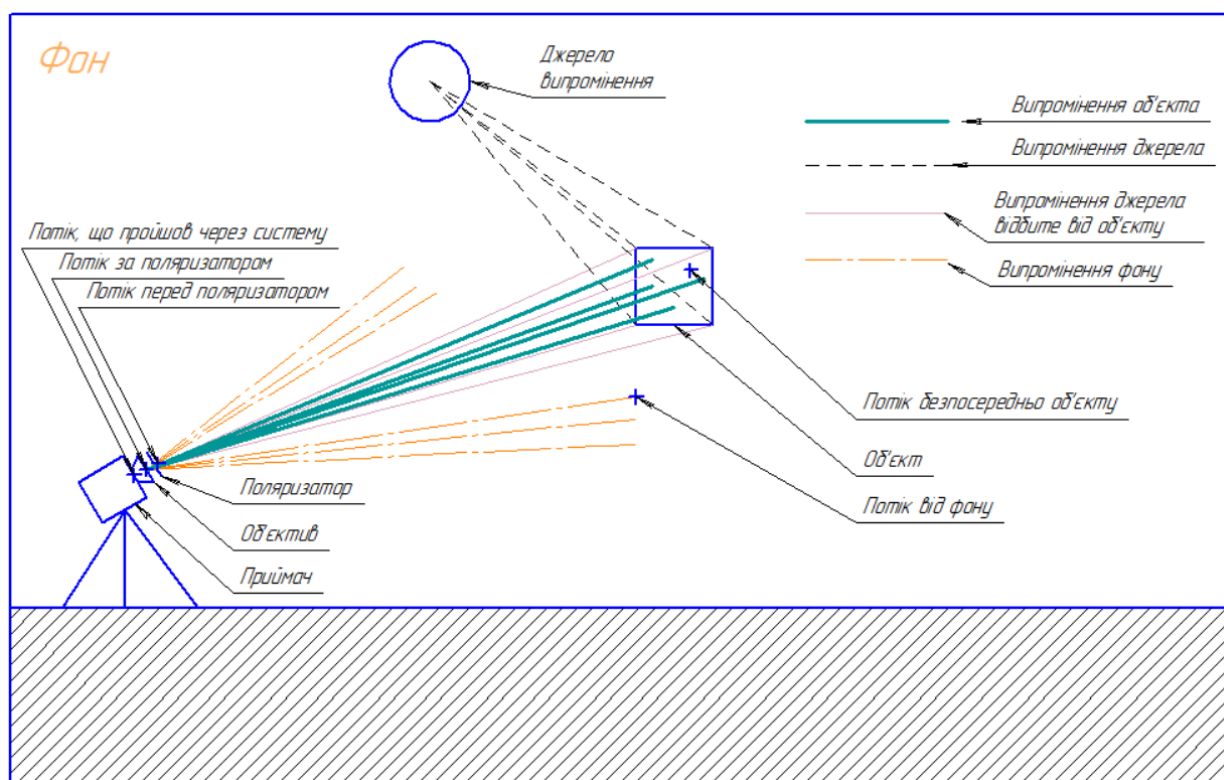


Рисунок 3.11 – Схема випромінення та ключових точок

Це надасть можливість відслідкувати зміну потоку випромінення на кожному з етапів його знаходження до системи. Та на основі останнього розрахованого потоку випромінення розрахувати сигнали та відношення сигнал/шум.

Перш за все необхідно розрахувати енергетичну світимість M об'єкта та фону, для чого можна використати закон Стефана-Больцмана (3.1):

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

де σ – стала Стефана-Больцмана та дорівнює $5,67 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2\text{К}}$

проте у нашому випадку на енергетичну світимість M впливає коефіцієнт випромінення ε , тож формула буде виглядати так (3.2):

$$M = \sigma T^4 \varepsilon$$

Система призначена для огляду верхньої полусфери, тобто виявляти повітряні прилади, такі як літаки, гелікоптери та БПЛА на фоні неба, тож коефіцієнтом випромінення фону буде коефіцієнт випромінення неба $\varepsilon_{\text{фон}} = 0,667$. Коефіцієнтом випромінення об'єкта буде середнє значення коефіцієнтів випромінення покриттів та матеріалів літальних апаратів, таких як, авіаційний акрил, алюмінієві фарби, титан, алюміній після сильного впливу атмосфери, що складає $\varepsilon_{\text{об}} = 0,7$ [37].

$$M_{\text{об}} = 331.89 \text{ (Вт} \cdot \text{м}^2\text{)}$$

$$M_{\text{фон}} = 307.95 \text{ (Вт} \cdot \text{м}^2\text{)}$$

Завдяки енергетичній світимості можемо дізнатися яскравість L об'єкту та фону з відношення, що виводиться із законна Ламберта (3.4):

$$M_e(\lambda) = \pi L_e(\lambda)$$

$$L = \frac{M}{\pi}$$

$$L_{\text{об}} = 105.69 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{стр}} \cdot \text{м}^2 \right)$$

$$L_{\text{фон}} = 98.07 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{стр}} \cdot \text{м}^2 \right)$$

Для розрахунку потоку випромінення необхідні площа вхідної зіниці та польової діафрагми. Вхідною зіницею у систему слугує поляризатор діаметром 25мм, для випадку без поляризатора, вхідна зіниця буде також 25 мм, для відповідності розрахунків. Польовою діафрагмою виступає приймач випромінення, у даному

випадку це мікроболометр зі сторонами робочої поверхні 10,88 та 8,16 мм. В результаті отримаємо такі площі польової діафрагми та вхідної зіниці:

$$A_{\text{пд}} = S_{\text{пр}} = ab = 8.878 \cdot 10^{-5}(\text{м}^2)$$

$$A_{\text{вх}} = 2\pi R^2 = 0.19625(\text{м}^2)$$

На цьому етапі починаються розрахунки потоків випромінення об'єкту та фону на різних етах їх надходження до системи. Перш за все розраховуються потоки випромінення Φ_e безпосередньо об'єкта та фону за формулою (3.6):

$$\Phi_e = L_e \varepsilon$$

$$\Phi_{\text{об}} = 73.99(\text{Вт})$$

$$\Phi_{\text{фон}} = 65.42(\text{Вт})$$

Далі розраховуються потоки випромінення Φ_e на нульовій відстані до вхідної зіниці від об'єкта та фона за формулою (3.7):

$$\Phi_{T_i}(\lambda, 0) = \varepsilon \cdot \tau_{aj}(\lambda) \cdot L_i$$

У даній формулі присутній коефіцієнт пропускання атмосфери, що розраховується за формулою:

$$\tau_{ai}(\lambda) = \tau_{H_2O_i}(\lambda) \cdot \tau_{CO_2_i}(\lambda) \cdot \tau_S(\lambda),$$

де $\tau_{H_2O}(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання парів води,
 $\tau_{CO_2}(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання вуглекислого газу,
 $\tau_S(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання, що дорівнює:

$$\tau_S(\lambda) = e^{K_{Ai}(\lambda) \cdot l},$$

де $K_A(\lambda) \text{ км}^{-1}$ - коефіцієнт ослаблення за рахунок ослаблення на атомах атмосфери, що дорівнює:

$$K_A(\lambda) = \frac{3.91}{MDV} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{1.3}$$

У ІЧ діапазоні спектральний коефіцієнт пропускання $\tau_S(\lambda)$, як і МДВ не грають значної ролі у формуванні коефіцієнту пропускання атмосфери, тож його прийнято ігнорувати або прирівнювати до 1. Коефіцієнт пропускання парів води $\tau_{H_2O}(\lambda)$ та коефіцієнт пропускання вуглекислого газу $\tau_{CO_2}(\lambda)$ знаходяться з відповідних довідників, проте оскільки ціль даного розрахунку знайти відношення сигнал/шум, ці параметри не будуть грати важливої ролі у розрахунку, через те, що однаково впливають на потік як об'єкту, так і фону, та мають невеликий вплив на випромінення, тож не будуть впливати на відношення сигнал/шум та можуть бути обрані будь якими. Для зручності розрахунків було прийняте рішення, що дані елементи коефіцієнту пропускання атмосфери будуть дорівнювати 1, а отже і $\tau_{ai}(\lambda)$, буде дорівнювати 1.

Оскільки $\tau_{ai}(\lambda) = 1$, то Φ_e на нульовій відстані від об'єкта до мікроболометра для об'єкту та фону буду дорівнювати Φ_e безпосередньо об'єкту та фона:

$$\Phi_{\text{обз}} = \Phi_{\text{об}} = 73.99(\text{Вт})$$

$$\Phi_{\text{фонз}} = \Phi_{\text{фон}} = 65.42(\text{Вт})$$

У розрахунках потоку випромінення, який пройшов через поляризатор, необхідно коефіцієнт пропускання поляризатора, який приведений в таблиці 3.3 в залежності від довжини хвилі λ . Обраний германієвий поляризатор через однаково гарну роботу на протязі всього діапазону 8-14 мкм, проте германій має поганий коефіцієнт пропускання, що виправляється просвітлюючим покриттям з обох сторін оптичної деталі, але на поляризаторі зі сторони штриховки таке покриття не наноситься, тож коефіцієнт пропускання такого поляризатора значно гірший ніж коефіцієнт пропускання германієвих лінз в об'єктиві, який буде наведений далі в таблиці 3.4 [38].

Таблиця 3.4 – Коефіцієнт пропускання поляризатора k в залежності від довжини хвилі λ

λ (мкм)	$\rho_{\text{поляр}}(\lambda)$	λ (мкм)	$\rho_{\text{поляр}}(\lambda)$
8	0.46	11.5	0.55
8.6	0.47	12	0.54
9	0.5	12.5	0.53
9.5	0.51	13	0.52
10	0.52	13.5	0.51
10.5	0.53	14	0.5
11	0.54		

Формула потоку випромінення, який пройшов через поляризатор у загальному випадку необхідна лише для розрахунку потоку випромінення від об'єкта, оскільки власний потік від об'єкта не поляризований і не буде залежати від положення поляризатору, у той час як потік фону, тобто неба поляризується за час проходження від верхніх шарів атмосфери до приймача завдяки пару, крапель води та інших складових атмосфери. Для потоку від об'єкта така поляризація також актуальна, але на відстані його спостереження поляризованим будуть тисячні долі процента, тож цим можна знехтувати. Формула потоку випромінення, що пройшло через поляризатор у загальному випадку:

$$\Phi_p(\lambda) = \varepsilon \cdot \tau_{aj}(\lambda) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(k(\lambda))}{n} \cdot L_i \cdot A_{\text{вх}} = \Phi_e \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(k(\lambda))}{n} \cdot A_{\text{вх}}$$

$$\Phi_p(\lambda) = 0.0746(\text{Вт})$$

Для розрахунку потоку випромінення частково поляризованого випромінення необхідно також врахувати коефіцієнт часткової поляризації k_e , який впливає на загальний коефіцієнт пропускання поляризатора. Даний коефіцієнт вимірюється експериментальним шляхом і в середньому даний коефіцієнт складає 2-10% для діапазону випромінення 2-14 мкм, для діапазону 8-14 мкм коефіцієнт складає 3-5%. Оскільки зміна відсотку поляризації протягом діапазону відбувається дуже часто та різко, візьмемо коефіцієнт поляризації 4%, як середнє для всього діапазону [39, 40]. Коефіцієнт пропускання поляризатора для частково поляризованої хвилі у випадку співпадіння осі поляризації випромінення з віссю поляризації та у випадку перпендикулярного положення осей поляризації відповідно розраховуються за даними формулами:

$$k_{||}(\lambda) = k(\lambda) \cdot (1 - k_e)$$

$$k_{\perp}(\lambda) = k(\lambda) \cdot k_e$$

Результати отриманих коефіцієнтів для часткової поляризації для паралельного положення наведені в таблиці 3.5, та для перпендикулярного положення в таблиці 3.6 відповідно.

Таблиця 3.5 – Коефіцієнт пропускання поляризатора при паралельному положенні поляризатора до площини поляризації $k_{\parallel}$

λ (мкм)	$\rho_{\text{поляр}}(\lambda)$	λ (мкм)	$\rho_{\text{поляр}}(\lambda)$
8	0.4416	11.5	0.528
8.6	0.4512	12	0.5184
9	0.48	12.5	0.5088
9.5	0.4896	13	0.4992
10	0.4992	13.5	0.4896
10.5	0.5088	14	0.48
11	0.5184		

Таблиця 3.6 – Коефіцієнт пропускання поляризатора при перпендикулярному положенні поляризатора до площини поляризації $k_{\perp}$

λ (мкм)	$\rho_{\text{поляр}}(\lambda)$	λ (мкм)	$\rho_{\text{поляр}}(\lambda)$
8	0.0184	11.5	0.022
8.6	0.0188	12	0.0216

9	0.02	12.5	0.0212
9.5	0.0204	13	0.0208
10	0.0208	13.5	0.0204
10.5	0.0212	14	0.02
11	0.0216		

Формули потоку випромінення для частково поляризованого випромінення при паралельному та перпендикулярному положенні поляризатора відповідно:

$$\Phi_{\parallel}(\lambda) = \varepsilon \cdot \tau_{aj}(\lambda) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (k_{\parallel}(\lambda))}{n} \cdot L_i \cdot A_{\text{BX}} = \Phi_e \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (k_{\parallel}(\lambda))}{n} \cdot A_{\text{BX}}$$

$$\Phi_{\perp}(\lambda) = \varepsilon \cdot \tau_{aj}(\lambda) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (k_{\perp}(\lambda))}{n} \cdot L_i \cdot A_{\text{BX}} = \Phi_e \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (k_{\perp}(\lambda))}{n} \cdot A_{\text{BX}}$$

$$\Phi_{\parallel}(\lambda) = 0.0633(\text{Вт})$$

$$\Phi_{\perp}(\lambda) = 0.0026(\text{Вт})$$

Для потоку випромінення, що пройшов через оптичну систему необхідно розрахувати коефіцієнт пропускання оптичної системи $\tau_{oi}(\lambda)$, що дорівнює добутку коефіцієнт пропускання ρ елементів системи.

Для даного розрахунку був обраний стандартний трьох-лінзовий об'єктив з германієвими лінзами з просвітлюючими покриттям з обох сторін лінзи, який продемонстрований на схемі [41]:

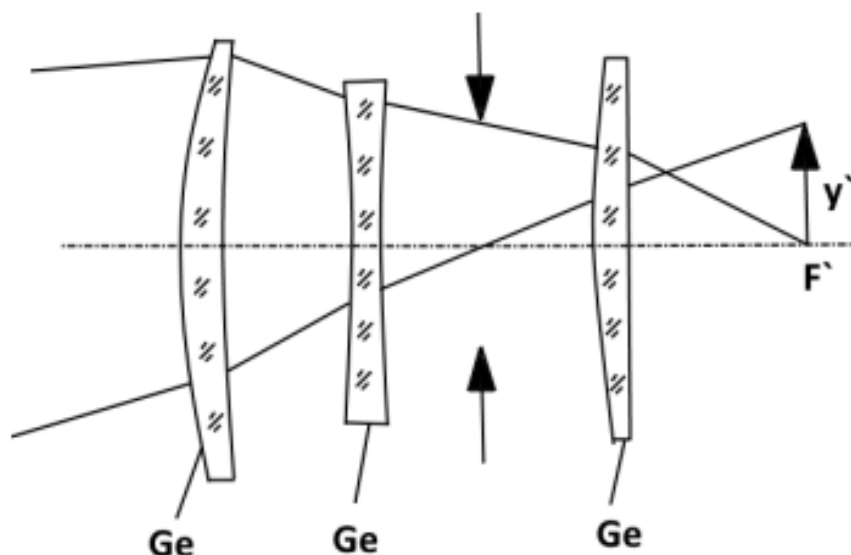


Рисунок 3.12 – Три-лінзовий об'єктив з германієвими лінзами

Коефіцієнт пропускання германієвих лінз приведено в таблиці 3.7:

Таблиця 3.7 – Коефіцієнт пропускання германієвих лінз з просвітлюючими покриттями в діапазоні 8-14 мкм

λ (мкм)	$\tau_o(\lambda)$	λ (мкм)	$\tau_o(\lambda)$
8	0.96	11.5	0.93
8.5	0.95	12	0.88
9	0.97	12.5	0.86
9.5	0.98	13	0.84
10	0.99	13.5	0.8
10.5	0.98	14	0.78
11	0.97		

Коефіцієнт пропускання оптичної системи:

$$\tau_o = \rho_{Ge} \cdot \rho_{Ge} \cdot \rho_{Ge} = \rho_{Ge}^3$$

Коефіцієнт пропускання даної оптичної системи наведено в таблиці 3.8:

Таблиця 3.8 – Коефіцієнт пропускання оптичної системи в діапазоні 8-14 мкм

λ (мкм)	$\tau_o(\lambda)$	λ (мкм)	$\tau_o(\lambda)$
8	0.8847	11.5	0.8044
8.5	0.8573	12	0.6815
9	0.9127	12.5	0.6361
9.5	0.9412	13	0.5927
10	0.9703	13.5	0.512
10.5	0.9412	14	0.4746
11	0.9127		

Формула для розрахунку середнього потоку випромінення $\Phi'(\lambda)$, що пройшов через систему для загального випадку та для різних положень поляризатора при частково поляризованому випромінненні:

$$\Phi_e'(\lambda) = \varepsilon \cdot \tau_{aj}(\lambda) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(k(\lambda))}{n} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(\tau_o(\lambda))}{n} \cdot L_e \cdot \frac{A_{пд} \cdot A_{вх}}{(f')^2} = \Phi_p(\lambda) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(\tau_o(\lambda))}{n} \cdot \frac{A_{пд}}{(f')^2}$$

$$\Phi_{e||}'(\lambda) = \varepsilon \cdot \tau_{aj}(\lambda) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(k_{||}(\lambda))}{n} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(\tau_o(\lambda))}{n} \cdot L_e \cdot \frac{A_{пд} \cdot A_{вх}}{(f')^2} = \Phi_{||}(\lambda) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(\tau_o(\lambda))}{n} \cdot \frac{A_{пд}}{(f')^2}$$

$$\Phi_{\perp}'(\lambda) = \varepsilon \cdot \tau_{aj}(\lambda) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(k_{\perp}(\lambda))}{n} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(\tau_o(\lambda))}{n} \cdot L_e \cdot \frac{A_{пд} \cdot A_{вх}}{(f')^2} = \Phi_{\perp}(\lambda) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n(\tau_o(\lambda))}{n} \cdot \frac{A_{пд}}{(f')^2}$$

Використовуємо загальний випадок для потоку від об'єкту і положення поляризатору для потоку від фону:

$$\Phi'_{\text{оп}}(\lambda) = 0.00033(\text{Вт})$$

$$\Phi'_{\text{ф||}}(\lambda) = 0.00028(\text{Вт})$$

$$\Phi'_{\text{ф}\perp}(\lambda) = 1.16728 \cdot 10^{-5}(\text{Вт})$$

Для порівняння результатів також знайдемо потоки випромінювання для об'єкту та фону, що пройшли через систему без поляризатору за формулою:

$$\Phi_e'(\lambda) = \varepsilon \cdot \tau_{aj}(\lambda) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_o(\lambda))}{n} \cdot L_e \cdot \frac{A_{\text{пд}} \cdot A_{\text{вх}}}{(f')^2} = \Phi_e \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_o(\lambda))}{n} \cdot \frac{A_{\text{пд}} \cdot A_{\text{вх}}}{(f')^2}$$

$$\Phi'_o(\lambda) = 0.00064$$

$$\Phi'_\text{ф}(\lambda) = 0.00057$$

Оскільки ціль даного розрахунку отримання відношення сигнал/шум, необхідно знайти шум системи: для цього використаємо температурну чутливість NETD та розрахуємо сигнал даною формулою:

$$U_\psi = \frac{S_{\text{інт}}}{D} \sqrt{\frac{\Delta f}{\Delta f_{\text{пасп}}}}$$

Випромінювальна здатність D:

$$D = \frac{4}{NETD \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{dM(\lambda, T_{\text{пасп}})}{dT} d\lambda},$$

$$\text{де } \int_8^{14} \frac{dM(\lambda, T = 300K)}{dT} d\lambda = 263 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

Звідси $D = 2534.8542 \text{Вт}^{-1}$

$$\Delta f = \frac{1}{2t_k} = 100 \text{Гц}$$

$$U_\psi = 4.4632 \cdot 10^{-6} (\text{В})$$

Сигнал, що приймає ПВ, розраховується за формулою:

$$U_s = S_{\text{інт}} \cdot \Phi'$$

$$U_o = 0.005138 (\text{В})$$

$$U_\phi = 0.004543 (\text{В})$$

$$U_{\text{оп}} = 0.002641 (\text{В})$$

$$U_{\phi||} = 0.002241 (\text{В})$$

$$U_{\phi\perp} = 9.3382 \cdot 10^{-5} (\text{В})$$

Відношення сигнал/шум буде представляти з себе відношення різниці сигналу об'єкту та фону до шуму. Дана різниця характеризує собою корисний сигнал від об'єкта, який має бути більшим від шуму, щоб бути помітним на фоні. Відношення сигнал/шум продемонструє контраст між об'єктом та фоном. Першим буде розраховане відношення для системи без поляризатора за формулою:

$$\mu_{\text{бп}} = \frac{U_o - U_{\phi}}{U_{\psi}}$$

$$\mu_{\text{бп}} = 133.41$$

Відношення для системи з поляризатором для різних положень поляризатора:

$$\mu_{||} = \frac{U_{\text{оп}} - U_{\phi||}}{U_{\psi}}$$

$$\mu_{\perp} = \frac{U_{\text{оп}} - U_{\phi\perp}}{U_{\psi}}$$

$$\mu_{||} = 89.47$$

$$\mu_{\perp} = 570.69$$

Як видно з отриманих результатів відношення сигнал/шум для паралельного положення поляризатору у півтори рази менший ніж відношення для системи без поляризатору, це відбувається через коефіцієнт пропускання поляризатора, який дорівнює приблизно 0.5, тобто поглинає приблизно половину всього випромінення, що критично впливає на контраст. Якби його коефіцієнт пропускання був більшим,

то відношення приблизно дорівнювало б відношенню системи без поляризатора, проте відношення для перпендикулярного положення значно вище за всі інші відношення завдяки тому, що поляризатор відрізає більшу частину випромінювання від фону, що створило суттєвий контраст між об'єктом та фоном.

3.3 Ймовірність виявлення об'єкту

З отриманих відношень сигнал/шум можна знайти ймовірність виявлення об'єкту, яка зазвичай рахується відповідно до критерієв Неймона-Пірсона [42], проте в нас є нестача даних для проведення розрахунків, тож використаємо спрощені розрахунки [43].

Величина відношення сигнал/шум SNR_E що сприймає оператор, визначає ймовірність розпізнавання зображення об'єкта P_r , яка може бути розрахована за формулою:

$$P_r = \frac{(SNR_E)^k}{1 + (SNR_E)^k},$$

де $k = 2,7 + 0,7SNR_E$. В таблиці наведено числові значення залежності ймовірності розпізнавання від відношення сигнал/шум SNR_E .

Таблиця 3.9 – Залежність ймовірності розпізнавання P_r від відношення сигнал/шум SNR_E

SNR_E	P_r	SNR_E	P_r	SNR_E	P_r
0	0,000	1,0	0,500	2,0	0,945
0,1	0,002	1,1	0,582	2,1	0,957
0,2	0,010	1,2	0,656	2,2	0,966
0,3	0,029	1,3	0,721	2,3	0,973

0,4	0,061	1,4	0,776	2,4	0,979
0,5	0,108	1,5	0,821	2,5	0,983
0,6	0,169	1,6	0,858	2,6	0,987
0,7	0,243	1,7	0,887	2,7	0,990
0,8	0,326	1,8	0,911	2,8	0,992
0,9	0,413	1,9	0,930	2,9	0,994

Як видно з таблиці, вже при відношенні сигнал/шум = 2.9, ймовірність виявити об'єкт вже майже гарантована, для наших значень, це буде дорівнювати 1 для кожного з випадків. Це відбувається через мале значення NETD, яке надає можливість навіть при невеликій різниці температур розрізняти об'єкт на фоні. Тож у даному випадку, ефективність виявлення об'єктів для різних варіантів досить велике, проте все може змінитися при погіршенні навколишнього середовища, при якому кількість випромінення, що потрапляє на приймач значно зміниться. В цей момент більше відношення сигнал/шум матиме більше вірогідність виявити об'єкт та зберегти значення більше трьох.

3. 4 Висновки до розділу 3

Геометричні розрахунки продемонстрували, що розглянута система може виявляти більшу частину БПЛА на відстані до двох кілометрів, а енергетичні розрахунки продемонстрували ефективність відділення контрастом об'єкту від фону. Хоч при паралельному положенні поляризатора до площини поляризації контраст виходить менший за систему без поляризатор, через коефіцієнт пропускання самого поляризатора, проте ми маємо значно вищий контраст при перпендикулярному положенні поляризатора відносно площини поляризації, який значно більший від всіх інших показників. Також видно, що завдяки гарним параметрам сучасних приймачів, навіть у випадку без поопляризатору ймовірність виявити об'єкт досить велика, але при суттєвому погіршенні оточення, варіант з поляризатором, матиме більшу вірогідність виявити об'єкт ніж варіант без поляризатору.

Першим і основним покращенням системи має бути зміна поляризатора на поляризатор з кращим коефіцієнтом пропускання, щоб при паралельному положенні поляризатора відношення сигнал/шум не сильно відрізнялося від варіанта без поляризатора. Другим покращенням має стати переробка системи для виявлення об'єктів на відстані 6 кілометрів, що є більшою відстанню, ніж більшість пікових висот найбільших БПЛА, які може виявити така система, а також у такому випадку система з поляризатором покаже себе краще через зменшення отриманого випромінення.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «ІНФРАСЕК»

4.1 Опис ідеї проекту

В даному розділі буде наведено можливий варіант стартап-проекту, на основі схем та розрахунків проведених у минулих розділах.

Ідея проекту полягає в розробці оптичних систем спостереження за специфічними об'єктами на замовлення на основі представлених даних о об'єктах замовником.

Оскільки основа роботи полягає у виявленні та спостереженні за об'єктом на однорідному фоні, це можуть бути не лише БПЛА на фоні неба, а й інші об'єкти на інших фонах. Як видно з розрахунків і характеристик мікроболометра, у таких систем є можливість розпізнавати об'єкти на фоні з невеликою різницею температур навіть у випадку без наявності поляризатора, що значно розширює спектр можливих виконаних задач. Таким чином виконання завдання буде більше залежить від безпосередньо бажань клієнта.

Зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів, наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка персональних оптичних систем виявлення та спостереження	Авіаційна	Системи спроектовані безпосередньо під їх задачі з гарним результатом виконання
	Служби безпеки	
	Інші	

Далі проводиться аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї в порівнянні з пропозиціями конкурентів:

— визначається перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

– визначається попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

– проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Як видно з табл. 4.2, сильними сторонами проекту є безкоштовне програмне забезпечення, великий кут поля зору та мале значення тета-дисторсії. Нейтральними сторонами можна вважати компактність та віддалення зіниці.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Системи KVS	Hikvision	InnerVision			
1.	Вартість продукту	Залежить від вимог замовника	>1000 \$	>1000 \$	>1000 \$		+	
2.	Компактність	+	+	+	+		+	
3.	Дистанція	За замовленням	2км	500м	Не менше 1 км		+	
4.	Метод	Оптичний	Радіо	Оптичний	Оптичний / Радіо		+	
5.	Ініціалізація	+	-	-	+		+	

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Даний крок служить для проведення аудиту технології, за допомогою якої можна втілити в життя ідею створення проекту.

Визначення можливості технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових, що наведені нижче, в табл. 4.3

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Розробка персональних оптичних систем виявлення та спостереження	Автоматизований розрахунок	Наявні	Доступні
2.		Прогнозування кінцевих результатів	Наявні	Доступні
3.		Оптимізація та покращення існуючих систем	Наявні	Доступні
4.		Знаходження нових варіантів роботи для схеми	Наявні	Доступні
Обрано дві технології реалізації ідеї: автоматизований розрахунок та прогнозування кінцевих результатів.				

У разі застосування технології автоматизовано розрахунку, можна виконати декілька варіантів розрахунків: по бажаним даним дізнатися кінцевий результат параметрів системи, зворотнім розрахунком отримати певні необхідні параметрів, оптимізувати чи покращити систему за існуючими даними, розрахувати систему за параметрами навколишньої середовища, за параметрами системи дізнатися параметри середовища для якого підходить система.

Як висновок можна сказати, що автоматичними розрахунками можна виконати більшість необхідних задач по проектуванню системи для бажаних параметрів, певного середовища і так далі. Дана можливість максимально розширить можливості по виконанню поставлених.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В даному підрозділі буде визначено ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, а також ринкові загрози, які можуть викликати перешкоди під час реалізації проекту.

Аналіз попиту (наявність попиту, обсяг та динаміка розвитку ринку) наведений у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	3
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	475-500 млн. дол.
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу	Відсутні
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	13%

Після аналізу ринку, можна зробити висновок, що потенційний ринок є досить привабливим для входження, оскільки динаміка ринку зростає, а обмежень для входу немає.

Далі буде визначено потенційні групи клієнтів та їх характеристики. Крім цього, для кожної групи клієнтів, буде сформовано орієнтовний перелік вимог до товару (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
-------	--------------------------	--	---	-----------------------------

1.	Забезпечення безпеки людей, територій, об'єктів	Воєні	Якість, надійність, зручність. Економічна складова, мобільність, висока точність зображення	Приваблива ціна, легкість використання. Гарантія якості, подальший сервіс
2.	Дослідження навколишнього середовища	Правоохоронні органи		
		Працівники наукових галузей		

Як видно з табл. 4.5, основною цільовою аудиторією є правоохоронні органи та працівники різних наукових галузей.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Компанії-конкуренти - міжнародні	Реалізація проекту на міжнародній арені може бути складною	Створити моделі продукції більш підходящих великим замовникам
2.	Вихід на ринок більш відомих компаній	Вихід на ринок компаній які мають відомий бренд та які вже мають довіру клієнтів	Створення продукту, який відіграє від слабких сторін конкурента
3.	Складність виходу на вітчизняний ринок	Існування основних контрактних гравців на ринку, не можливість отримати стабільні контракти	Робити нахил на наукову галузь та приватних підприємців
4.	Поведінка конкурентних компаній	Поява більшої кількості варіантів продукції, яка за рахунок нижчої ціни і невеликої різниці від бажаного результату, буде привабливішою за	Вдосконалення власної продукції, пошук шляхів для суттєвого зниження ціни зі збереженням високої якості

		штучний продукт розроблений під певні вимоги	
--	--	--	--

Аналіз факторів загроз показав, що складність виходу на ринок, перш за все, полягає в непередбачуваній поведінці компаній-конкурентів, які вже є відомими на ринку. Крім цього на вітчизняному ринку вже є головні гравці, що працюють з великими державними підприємствами, що не дає отримати великі стабільні контракти, тож необхідно сконцентруватися на меншій незалежній категорії клієнтів у вигляді вчених та приватних підприємств.

Наступним кроком буде проведено аналіз можливостей (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Потреба клієнтів в обладнанні, що підходить для конкретно їхніх специфічних потреб	Велика кількість споживачів має специфічні потреби, які стандартні заводські варіанти продуктів не покриваю	Розробка продукції по унікальному замовлену клієнта
2.	Розширення ряду продукції	Створення постійної продукції, яка знизить кінцеву собівартість та підвищить дохід	Найчастіші схожі замовлення можливо привести до постійного продукту, що може налаштовуватися на найчастіші замовлені параметри
3.	Відсутність компаній в Україні	На вітчизняному ринку, наразі, немає технічної підтримки та представництв інших відомих компаній	Відносно вільний ринок держави, де розробляється продукт, сприяє можливості для реалізації та технічної підтримки
4.	Нові потреби споживачів	Нові потреби споживачів у схожих сферах стимулюють вдосконалення нової продукції	Розробка нових продуктів та вдосконалення старих, щоб задовольняти нові потреби споживачів

Аналіз факторів можливостей показав, що відсутність схожих компаній на вітчизняному ринку дає можливість зайняти провідні позиції для подальшого розвитку та впровадження продукції на світовий ринок. Додатково, концентруючись на персональних замовленнях можна забрати частину клієнтів у компаній, чії загальні продукти повністю не задовольняють потреби клієнтів.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку, наведений в табл. 4.8, показав, що наявність відомих конкурентів на світовій арені, в певній мірі, ускладнює вихід на ринок. Однак, у запропонованого проекту, завдяки більшій доступності та якості продукту, є можливість здобути першість на вітчизняному ринку, а також завоювати певний відсоток світового ринку.

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Монополістична конкуренція	Галузь є конкурентоспроможною, проте існує декілька явних лідерів	Проведення рекламних заходів для популяризації бренду
2. Глобальний рівень конкурентної боротьби	Компанії-конкуренти з різних країн світу	Здобуття першості на вітчизняному ринку та отримання міжнародних патентів
3. Внутрішньогалузева конкуренція	Конкуренція спостерігається лише в галузі систем безпеки	Розробка якіснішої та доступнішої продукції
4. Товарно-видова конкуренція	Конкуренція між товарами одного виду	Створення якіснішої та доступнішої продукції
5. Ціновий характер	Продукція є досить дорогою	Зменшити вартість продукції
6. Марочний характер	Для споживачів має значення бренд	Популяризувати власну продукцію

Після аналізу конкурентного ринку, наведеного в табл. 4.9, можна зробити висновок, що вихід на вітчизняний ринок майже не має перепон, однак є деякі

складнощі з виходом на міжнародний ринок. проект повинен бути відповідати вимогам споживачів по якості та ціні, а також мати певний маркетинговий потенціал.

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	KVS,Hikvision, InnerVision	Виробники окремих складових систем	Мають постачання в залежності від замовлень	Структури яким необхідно забезпечити безпеку територій	Використання більш застарілих зразків
Висновки	На вітчизняному ринку є один конкурент, інші зарубіжні	Вихід на ринок за рахунок реклами та гнучкості цін	Постачальники не впливають на роботу ринку	Клієнти надають перевагу низькій ціні та характеристикам продукту	Товари-замінники існують, однак вони не дають бажаного результату

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Потреби споживачів	Потреби споживачів обумовлюють необхідність розробки проекту
2.	Ціна продукції	Ціна продукції повинна бути меншою, ніж ціни компаній-конкурентів або більшою на стільки, щоб клієнт був готовий заплатити за відмінності від конкурентів
3.	Маркетинговий потенціал	Можливе створення імені на внутрішньому ринку з подальшими рекомендаціями на світовому ринку

4.	Простота експлуатації	Підхід є простим та з малими потребами у кваліфікації до користувачів
5.	Технічне обслуговування	Технічна допомога та гарантійна підтримка систем

В результаті обґрунтування факторів, приведеного в табл. 4.10, можна зробити висновок, що є декілька факторів, які обумовлюють необхідність розробки проекту, а саме: потреба споживачів у продукції, доступна ціна та постпродажне обслуговування клієнтів.

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з розробленим проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Потреби споживачів	9	+						
2.	Ціна продукції	17						+	
3.	Маркетинговий потенціал	16					+		
4.	Простота експлуатації	18			+				
5.	Технічне обслуговування	9				+			

З табл. 4.10 та табл. 4.11 видно, що слабкою стороною проекту є маркетинговий потенціал. Сильними факторами конкурентоспроможності можна назвати простоту експлуатації та максимальне виконання побажань клієнтів.

Таблиця 4.12 – SWOT аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. Простота експлуатації; 2. Технічне обслуговування.	Слабкі сторони: 1. Невпізнаваність компанії; 2. Основні конкуренти мають більший ряд послуг і продукції.
Можливості: 1. Можливість здобути лідерство на вітчизняному ринку; 2. Вихід на міжнародний ринок;	Загрози: 1. Поява нових гравців на ринку; 2. Слабка рекламна компанія; 3. Нові розробки конкурентів.

3. Удосконалення методу розрахунку.	
-------------------------------------	--

В результаті SWOT-аналізу, наведеного в табл. 4.12, можна зробити висновок, що сильними сторонами проекту є простота експлуатації та технічне обслуговування. До слабких сторін проекту можна віднести початкову невпізнаваність компанії та більш широкий спектр послуг та продукції у компаній-конкурентів. Ринкові можливості та загрози є наслідками впливу факторів. Основними можливостями є здобуття лідерства на вітчизняному ринку, подальший вихід на міжнародний ринок з попутною працею над методами розрахунку та проектування. До загроз можна віднести появу нових компаній-конкурентів, слабку рекламну компанію та потенційні нові розробки компаній-конкурентів.

Таблиця 4.1 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Проведення рекламної кампанії	65%	3-9 міс.
2.	Прийняття участі у міжнародних конференціях	45%	1-2 роки.
3.	Розповсюдження продукції у вітчизняних установах зі зниженою вартістю	25%	1 рік.
4.	Співпраця з навчальними закладами та надання ї послуг зі зниженою вартістю	20%	1-2 міс.
5.	Розширення групи товарів	70%	5-10 міс.

На основі SWOT-аналізу, було розроблено альтернативи ринкової поведінки, наведені в табл. 4.13, для виведення проекту на ринок, а також орієнтовний час реалізації даних альтернатив.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Держ-безпека	Готові	300 комплектів	Висока	Висока
2.	Наукова галузь	Готові	150 комплектів	Низька	Середня
3.	Приватні підприємці	Готові	500 копій	Низька	Низька
Які цільові групи обрано: Наукова галузь та приватні підприємці					

В результаті вибору цільових груп потенційних споживачів, наведеного в табл. 4.14, можна зробити висновок, що приватні підприємці є найбільш перспективною, через відсутність достатньої кількості компаній орієнтованих на них. Однак, компанія також буде поширювати свою продукцію і в інших галузях, таких як наукова та держ-безпека. Оскільки компанія буде працювати з декількома сегментами, було обрано стратегію диференційованого маркетингу.

В результаті визначення базової стратегії розвитку, наведеного в табл. 4.15, було прийнято рішення дотримуватися стратегії диференціації, оскільки продукція буде знаходити використання у декількох галузях. Обрана стратегія є

найдоцільнішою, тому що вона знижує ступінь замінності товару по відношенню до прямих конкурентів, а також зменшує чутливість до ціни, чим збільшує рентабельність.

Таблиця 4.2 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Розширення групи товарів	Нижча вартість товару в порівнянні з компаніями-конкурентами	Більша кількість продукції та низька ціна на неї	Стратегія диференціації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки.

Таблиця 4.3 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Ні, оскільки конкуренти мають схожий підхід	Компанія буде забирати існуючих користувачів та залучати нових	Так, оскільки оптимізаційна модель в усіх компаній схожа	Стратегія позиціонування

Після визначення базової стратегії конкурентної поведінки, наведеного в табл. 4.16, було прийнято рішення обрати стратегію позиціонування. Компанія показує чим продукт відрізняється від конкурентів, його унікальність, яку користь приносить

споживачу, а саме відбувається позиціонування на особливостях технології, що є важливим для споживачів.

Таблиця 4.4 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
1.	Висока якість	Стратегія диференціації	Використання сучасного програмного забезпечення, що дозволяє максимально точно виконати замовлення клієнта	Висока якість, простота, довга та якісна підтримка
2.	Підтримка та гарантії			
3.	Простота			

Після визначення стратегії позиціонування, наведеного в табл. 4.17, можна зробити висновок, що основними вимогами цільової аудиторії до товару є висока якість, простота та довга підтримка. Ключові конкурентоспроможні позиції надають можливість виконати ці вимоги.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Першим кроком маркетингової програми є розробка маркетингової концепції товару, наведена в табл. 4.18.

Таблиця 4.5 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Якісні оптичні системи	Висока якість зображення,	Висока якість зображення. Максимальна чіткість виконання

	нагляду за околишнім середовищем	простота використання	системи за параметрами або побажаннями клієнта
--	--	--------------------------	---

Формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач, показало, що споживачі, у яких буде впроваджено даний стартап-проект, будуть задовольнятися потреби.

Таблиця 4.6 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Система нагляду за середовищем		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Якість зображення	Нм	Тх
	2. Простота використання	Нм	Е
	3. Технічне обслуговування	М	Тх
	4. Низька ціна	М	Е
	Якість: стандарти, нормативи		
	Пакування: футляр з покриттям з мікрофібри, який знаходиться в коробці з пінопластом		
	Марка: DrimunOptics		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: не потребує навичок		
	Після продажу: гарантія протягом 12 місяців та підтримка клієнтів		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: за рахунок патенту на корисну модель, комерційної таємниці.			

Опис трьох рівнів моделі товару, наведений в табл. 4.19, дає можливість досить чітко представити продукт. Перевагами продукту є висока якість зображення, простота використання, технічне обслуговування та доступна ціна.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення
----------	-----------------------------------	---------------------------------	--	---

				ціни на товар/послугу
1.	\$1000+	\$600-1000	\$1500+	\$800+

Після аналізу рівня цін на продукцію компаній-конкурентів та рівня доходів цільової групи споживачів, було визначено межі встановлення ціни, наведені в табл 4.20. Оптимальною нижньою межею є \$800, а верхня межа залежить від замовлення. Встановлені межі дають перевагу перед продукцією компаній-конкурентів.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	На сьогоднішній день, споживачі купують продукцію безпосередньо у компанії розробника	Встановлення контактів зі споживачами. Розробка та реалізація програм з підтримки лояльності споживачів	Виробник продає товар безпосередньо споживачу (канал нульового рівня)	Збут продукції відбувається через сайт компанії розробника

Як видно з табл. 4.21, зазначені функції збуту та глибина каналу формують оптимальну систему збуту, яка відбуватиметься безпосередньо через сайт компанії розробника. Завдяки цьому можна досить просто встановлювати контакти зі споживачами та здійснювати їх подальшу підтримку.

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/ п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуютьс я цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонуванн я	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
--------------	--	--	---	--	--------------------------------------

1.	Клієнти дізнаються про нову продукцію з реклами в інтернеті, сайту розробника, наукових конференцій та за рекомендаціями інших	Соціальні мережі, форуми, публікації, інтернет.	SMM, контент-маркетинг	Представлення товару та його позиціонування для залучення нових клієнтів	"Доступна ціна та висока якість у кожному продукті"
----	--	---	------------------------	--	---

Оскільки цільова аудиторія отримує більшу частину інформації про нову продукцію через мережу інтернет, тому доцільними ключовими позиціями було обрано SMM та контент-маркетинг, як видно з табл. 4.22. Основною метою рекламного повідомлення є позиціонування продукції та зацікавлення нових споживачів.

4.6 Висновки до четвертого розділу

Після проведеного аналізу стартап-проєкту можна підвести підсумки та зробити певні висновки.

Попит на продукцію є, що підтверджується позитивною динамікою ринку та потребою споживачів у якісних приладах для спостереження для забезпечення своєї безпеки.

Вихід на світовий ринок є дещо ускладненим, оскільки на сьогоднішній день існує декілька відомих міжнародних компаній, які також займаються системами спостереження за оточенням.

Конкуренція на вітчизняному ринку у даній сфері є порівняно малою, лише один серйозний конкурент, що сприяє легкому виходу на ринок України.

Цільовою аудиторією є науковці і представники приватного бізнесу.

У якості альтернативи впровадження проекту, доцільно розширити групи продукції, щоб задовольнити потреби більшої кількості різних споживачів.

Перевагою запропонованого підходу є висока якість зображення та простота. Крім цього споживачам, після покупки, буде надана гарантія на товар та технічна підтримка. Проект буде захищено від копіювання патентом на корисну модель та комерційною таємницею.

Оскільки цільова аудиторія дізнається про нові товари переважно за допомогою мережі інтернет, профільних сайтів та спеціальних видань, було вирішено, що найбільш доцільним шляхом розповсюдження продукції є офіційний сайт розробника, на якому також можна реалізувати технічну підтримку користувачів.

Здійснення запропонованого проекту є доцільним, оскільки технології та проекти в області активно розвиваються, набираючи все більше популярності та інтересу публіки, завдяки великій перспективності даного напрямку.

ВИСНОВКИ

У даній роботі були розглянутий метод виявлення БПЛА за допомогою інфрачервоного поляризаційного каналу. Даний метод показав свою високу ефективність по відділенню об'єкту від фону за допомогою контрасту, який отримується за рахунок відрізання не поляризованого випромінення фону за допомогою поляризатора, що суттєво збільшує корисний сигнал від об'єкту.

Також наведені схеми реалізації такої системи та схеми перекриття верхньої полусфери. В результаті виявлено, що для системи не підходять більшість схем, які зменшують необхідну кількість камер як для одного сегменту, так і для перекриття верхньої полусфери.

З всіх схем одного сегменту найкраще підходить схема з поляризатором, що постійно обертається чи обертається ривками, через свою універсальність та можливість модернезації, для постійного отримання максимального контрасту при виявленні об'єкту.

З схем покриття полусфери нажаль найкраще підходить система з стаціонарними камерами, через неможливість ефективно рухати обрані схеми системи. Для руху необхідні системи з зафіксованими поляризаторами, що суттєво підвищує необхідну кількість камер, а з тим і кінцеву ціну схеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Що таке БПЛА та яка різниця між термінами “Дрон” та “БПЛА” [Електронний ресурс]. URL: <https://skyeton.com/our-blog/ssho-take-bpla-ta-yaka-rizniczya-mizh-terminamy-dron-ta-bpla.html>
- [2] Алешин Б. С., Суханов В. Л., Шибаев В. М., Шнырев А. Г. Типы беспилотных летательных аппаратов // Межотраслевой альманах. 2014. № 46. [Електронний ресурс]. URL: <http://slaviza.ru/print:page,1,1494-tipy-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov.html>.
- [3] RAM UAV [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/RAM_UAV
- [4] RAM UAV – український безпілотник-камікадзе [Електронний ресурс]. URL: <https://uprom.info/news/vpk/ram-uav-ukrainskyj-bezpilotnyk-kamikadze/>
- [5] ВСУ захватили самый современный дрон РФ "Орлан-30": в чем его особенности [Електронний ресурс]. URL: <https://focus.ua/digital/524625-vsuzahvatili-samyy-sovremennyy-dron-rf-orlan-30-v-chem-ego-osobennosti>
- [6] "Байрактар" выходит на разведку: как ударный дрон помогает ВСУ, его характеристики [Електронний ресурс]. URL: <https://www.unian.net/war/bayraktar-kak-dron-pomogaet-vsuharakteristiki-hit-obayraktar-novosti-vtorzheniya-rossii-na-ukrainu-11762734.html>
- [7] Сокол-300 [Електронний ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB-300>
- [8] В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. Наук, В.А.ПОСОШЕНКО, канд. Техн. Наук, В.В. ВОРОНИН, канд. Техн. Наук, В.И. Колесник, А.И. Капуста, Н.В. Рыбников, Е.В. Першин В. В. // Методы обнаружения-распознавания радиолокационных, акустических, оптических и инфракрасных сигналов беспилотных летательных аппаратов [Електронний ресурс]. URL: <http://rt.nure.ua/article/view/239529/238033>
- [9] Jimmy Flórez José Ortega Andrés Betancourt Andrés García Marlon Bedoya Juan S. Botero // A review of algorithms, methods, and techniques for detecting UAVs and

- UAS using audio, radiofrequency, and video applications [Електронний ресурс]. URL: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992020000200262#B36
- [10] Roberto Opromolla, Giancarmine Fasano, and Domenico Accardo // A Vision-Based Approach to UAV Detection and Tracking in Cooperative Applications [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6210765/>
- [11] Kristan P. Gurton // Calibrated Long-Wave Infrared (LWIR) Thermal and Polarimetric Imagery of Small Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Birds [Електронний ресурс]. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1059353.pdf>
- [12] Adrian Carrio, Hriday Bavle, Pascual Campoy // Attitude estimation using horizon detection in thermal images [Електронний ресурс]. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1756829318804761>
- [13] Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження (*монографія*) К.: «Аверс», 2013. – 178 с.
- [14] Тарасов В.В., Якушенков // Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. - М.: Университетская книга; Логос, 2007. - 192 с. [Електронний ресурс] URL: https://www.elec.ru/files/2020/03/03/Tarasov_V.V._YAkushenkov_YU.G._Dvuh- i mnogodia.PDF
- [15] Kolobrodov V.G., Mykytenko V.I., Tymchik G.S. // Technology of Infrared Radiation Polarizer / Proceedings of SPIE, Optical Fibers and Their Applications, 2020, 1145609.
- [16] Object detection in natural backgrounds predicted by discrimination performance and models // Ann Marie Rohaly, Albert J. Ahumada Jr, Andrew B. Watson [Електронний ресурс] URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698997001569?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7744a83d5a365b3e

- [17] «A polarimetric longwave infrared imager» // Johan Eriksson, David Gustafsson and Niclas Wadströmer. [Електронний ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/323695771_A_polarimetric_longwave_infrared_imager
- [18] Спекл-поляриметр: краткое описание [Електронний ресурс] URL: http://lnfm1.sai.msu.ru/kgomfc_design_ru.php
- [19] «Wavelength- or Polarization-Selective ThermalInfrared Detectors for Multi-Color or PolarimetricImaging Using Plasmonics and Metamaterials» // Shinpei Ogawa and Masafumi Kimata. [Електронний ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/316724233_Wavelength-or_Polarization-Selective_Thermal_Infrared_Detectors_for_Multi-Color_or_Polarimetric_Imaging_Using_Plasmonics_and_Metamaterials
- [20] А. Г. Протасов, Ю. Ю. // Лисенко технології теплового неруйнівного контролю [Електронний ресурс]. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41342/1/Pidruchnuk_TTNK_2021.pdf
- [21] Энергетическая яркость [Електронний ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%D1%8F%D1%80%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C>
- [22] Теория оптических систем [Електронний ресурс]. URL: https://scask.ru/e_book_tos.php?id=39
- [23] Поля і хвилі в телекомунікації [Електронний ресурс]. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/5402/1/The_Fields_and_waves.pdf
- [24] В.О.Клименко В.І. Тарасевич В.Є.Дугінов Д.В.Гамов // ФІЗИКА КОЛИВАЛЬНИХ І ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ, ОПТИКА [Електронний ресурс]. URL: https://org2.knuba.edu.ua/pluginfile.php/121741/mod_resource/content/4/konspekt%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D1%96%20%D1%85%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%96.pdf

- [25] «И.Е. Иродов // «Волновые процессы. Основные законы» [Электронный ресурс]. URL: <https://zfftt.kpi.ua/images/library/Irodov3.pdf>
- [26] Loo, Fook Leong // Polarimetric thermal imaging [Электронный ресурс]. URL: https://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/3563/07Mar_Loo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [27] Поляризация электромагнитных волн [Электронный ресурс]. URL: <http://audioakustika.ru/node/1000>
- [28] О.В.Слободянюк. Оптика [Электронный ресурс]. URL: http://www.phys.univ.kiev.ua/exphys/Optics/3_2-3_V0416-05.pdf
- [29] Oscar Sandus // A Review of Emission Polarization [Электронный ресурс]. URL: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-4-12-1634>
- [30] Как работает поляризационный фильтр [Электронный ресурс] URL: <https://top-mob.com/polarization/>
- [31] Параметры Стокса [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8B_%D0%A1%D1%82%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B0
- [32] Field Guide to Polarization // Edward Collett [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/ebook/Download?fullDOI=10.1117%2F3.626141&isFullBook=True>
- [33] Основные характеристики и параметры приемников излучения [Электронный ресурс]. URL: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/7675/5/%D1%85%D0%B0%D1%80%20%D0%B8%20%D0%BF%D0%B0%D1%80%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B5%D0%BC%20%D0%B8%D0%B7%D0%BB.pdf>
- [34] Signal-to-noise ratio (S/N or SNR) // Robert Sheldon, John Burke [Электронный ресурс]. URL: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/signal-to-noise-ratio>
- [35] MAN – FAS – NAVY Document ES310 / Introduction to Naval Weapons

- Engineering – Electro-Optical Imaging Systems [Электронный ресурс]. URL: https://man.fas.org/dod-101/navy/docs/es310/EO_image/EO_Image.htm
- [36] DLD640(17μm) Uncooled Infrared FPA Detector [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dali-tech.us/products/dld64017m-uncooled-infrared-fpa-detector-86.html>
- [37] КОЭФФИЦИЕНТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://leg.co.ua/info/spravka/koefficienty-izlucheniya-razlichnyh-materialov.html>
- [38] Ge поляризатор [Электронный ресурс] URL: https://www.tydexoptics.com/ru/products/spectroscopy/ir_polarizers/ge_polarizer/
- [39] Degree of linear polarization in spectral radiances from water-viewing infrared radiometers // J.A. Shaw [Электронный ресурс] URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18319904/>
- [40] Infrared polarization in the natural Earth environment // J.A. Shaw [Электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/252720311_Infrared_polarization_in_the_natural_Earth_environment
- [41] Германиевые окна и линзы для термографии [Электронный ресурс] URL: https://www.tydexoptics.com/ru/products/pyrometry/ge_windows/
- [42] Построение оптимальных критериев [Электронный ресурс] URL: <https://tvims.nsu.ru/chernova/ms/lec/node43.html>
- [43] Melamed R., Yitzhaky Y., Kopeika N. S., Rotman S. R. Experimental comparison of three target acquisition models // Optical Engineering. – 1998 – Vol. 37. – № 7. – P. 1902–1913.