

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
ЛАЗЕРНА СИСТЕМА ДЕТЕКТУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ФТОІМ-22-1
Паламар О.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Афанасьєва О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Паламарю Олександрю Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Лазерна система детектування оптичних пристроїв

затверджена наказом університету від « 03 » листопада 2023 р. № 1285 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 23 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Методи виявлення оптичних систем; характер оптичного випромінювання; довжина хвилі лазерних діодів 800 нм та 900 нм.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Система активного лазерного виявлення дальньої дії на основі світловідбиття.

2 Метод багатоканальної обробки карти помітності перед об'єднанням для виявлення оптичних систем.

3 Розпізнання оптичних систем топологічними методами.

4 Розрахунок параметрів та характеристик фотоприймального вузла системи приймальної оптики.

5 Моделювання оптичної системи приймальної оптики

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

Демонстраційний матеріал – 12 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерні системи детектування оптичних пристроїв	01.09.23–29.09.23	Виконано
2	Вибір оптичних та механічних вузлів системи	03.10.23–24.10.23	Виконано
3	Розрахунок параметрів оптичної системи	27.10.23–16.11.23	Виконано
4	Моделювання детектування оптичного пристрою	17.11.23–28.11.23	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	02.12.23–18.12.23	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	24.12.23–03.01.24	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	05.01.24–17.01.24	Виконано
8	Проходження перевірки на плагіат	20.01.24–21.01.24	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.01.24–24.01.24	

Дата видачі завдання 01 вересня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. ФОЕТ Афанпсьєва О.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 55 с., 32 рис., 3 табл.,
1 додаток, 31 джерело.

СВІТЛОВІДБИТТЯ, КАРТА ПОМІТНОСТІ, АКТИВНА ЛАЗЕРНА СИСТЕМА, БАГАТОКАНАЛЬНА ОБРОБКА, ЛАВИННИЙ ФОТОДІОД

Мета роботи – дослідження фізичних властивостей систем лазерного детектування, моделювання роботи такої системи.

Об'єкт дослідження – лазерна система детектування оптичних пристроїв

Методи дослідження – аналітичні та чисельні.

Досліджено та визначено основні параметри та властивості фотоприймального вузла системи приймальної оптики. Проведено моделювання розподілу випромінювання в фотоприймальному вузлі системи приймальної оптики, визначено пляму розсіювання для лінзи фотоприймального модуля, проведено розрахунок сигнал – шум на вході фотоприймача.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 55 pp., 32 figures, 3 tables, 1 application, 31 sources.

REFLECTION, VISIBILITY MAP, ACTIVE LASER SYSTEM, MULTI-CHANNEL PROCESSING, AVALANCHE PHOTODIODE

The purpose of the work is to study the physical properties of laser detection systems, modeling the operation of such a system.

The object of research is a laser detection system for optical devices.

Research methods are analytical and numerical.

The main parameters and properties of the photo-receiving unit of the receiving optics system have been studied and determined. Modeling of radiation distribution in the photo-receiving unit of the receiving optics system was carried out, the scattering spot for the lens of the photo-receiving module was determined, and the signal-to-noise ratio at the input of the photo-receiver was calculated.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз існуючих аналогів лазерних систем реєстрації оптики.....	8
2 Система активного лазерного виявлення дальньої дії на основі світловідбиття.....	9
2.1 Лазерна і коліimatorна системи.....	10
2.2 Система формування зображення	11
2.3 Практичні можливості системи	11
3 Метод багатоканальної обробки карти помітності перед об'єднанням для виявлення оптичних систем	13
3.1 Метод спектральних залишків для виділення помітності.....	13
3.2 Метод розпізнавання цілей, заснований на виділенні помітності.....	15
4 Розпізнавання оптичних систем топологічними методами	20
4.1 Опис складових частин лазерної системи реєстрації оптики	20
4.1.1 Оптична частина	23
4.1.2 Механічна частина.....	28
4.2 Розрахунок параметрів та характеристик фотоприймального вузла системи приймальної оптики	29
4.2.1 Енергетичний розрахунок	29
4.2.2 Розрахунок характеристик випромінювання при лазерному зондуванні на різних дистанціях	35
4.2.3 Теоретичний розрахунок сигнал-шум на вході фотоприймача	39
5 Моделювання оптичної системи приймальної оптики	41
5.1 Моделювання розподілу випромінювання в фотоприймальному вузлі системи приймальної оптики	41
5.2 Визначення плями розсіювання для лінзи фотоприймального модуля	44
5.3 Дослідження та визначення основних параметрів та властивостей фотоприймального вузла оптики	46
Висновки	52
Перелік джерел посилання	53
Додаток А Демонстраційний матеріал	56

ВСТУП

Протягом останніх десятиліть різноманітні фотоелектричні пристрої широко використовуються в системах розвідки та контррозвідки, для визначення/розпізнавання цілей, попередження/захисту тощо, як в оборонних, так і в наступальних сценаріях. Загалом фотоелектричні обладнання складаються з оптичної лінзи та фотоелектричного датчика. Оскільки більшість оптичних лінз, які використовуються в фотоелектричних пристроях, мають датчики або візирні сітки, що закріплені на їх фокальних площинах, то при освітленні цих фотоелектронних пристроїв лазером, відбита хвиля вища за дифузні цілі в середньому на 2–4 порядки величини. Цей ефект називається ефектом світловідбиття або так званим "котячим оком". Таким чином, висока доступність та впровадження систем візуалізації як у цивільних, так і військових сценаріях підштовхнули до вивчення ефекту "котячого ока" як простого підходу до ідентифікації та визначення прихованих фотоелектричних систем візуалізації.

Шляхом застосування активної лазерної розвідувальної техніки на основі світловідбиття, можна виявити деякі пасивні фотоелектричні пристрої, такі як камери, телескопи та приціли для гвинтівок, з високою напрямною точністю, що сприяє розвитку застосування в сучасних техніках розвідки та антитерористичних методиках, для ідентифікації небезпечних оптичних цілей.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ РЕЄСТРАЦІЇ ОПТИКИ

Розглянемо дистанцію розпізнавання різних систем. Снайперський детектор SLD400 і SLD500, розроблений компанією CILAS, Франція, може виявити оптичний приціл за допомогою ефекту котячого ока на відстані до 1 км вдень і до 3 км вночі [1]. Портативна лазерна система протидії, відома як PAPV, розроблена Росією [2], дозволяє виявляти снайперів і діє як блок протидії проти бойових систем, оснащених електрооптичними пристроями, таких як танки, ударні гелікоптери тощо, з радіусом дії приблизно від 0,3 км до 1,5 км. Система оптичного виявлення [3] була протестована на різних відстанях до 1,15 км, показуючи можливість виявлення прицілів при денному світлі. Двоканальна активна лазерна система детектування для виявлення ефекту світловідбивання [4], потужність відбитого сигналу якого більш ніж у 2 рази перевищує фонову має максимальну відстань 2,5 км. На додаток до статичних цілей, таких як оптичні приціли та біноклі, також повідомляється, що активне лазерне виявлення є багатообіцяючим методом виявлення та відстеження рухомих пристроїв спостереження [5]. За допомогою активної лазерної системи виявлення, заснованої на використанні ефекту світловідбиття, було досягнуто експериментально розпізнавання статичних цілей, а також ідентифікація рухомого дрону в режимі реального часу. Однак найбільший робочий діапазон у цьому експерименті становив лише 150 м, тоді як робота на великих відстанях є дуже важливою характеристикою для виявлення дронів. Також вже існує система, здатну розпізнавати об'єкти на відстані 5,7 км за допомогою КМОН структури [6]. Системи Raptor та Narcissus американської розробки дозволяють виявляти цілі на відстані до 18 та 12 км відповідно. Система розпізнавання оптичних систем топологічними методами [7] розпізнає цілі на відстані до 3 км. Розглянемо деякі з цих систем.

2 СИСТЕМА АКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИЯВЛЕННЯ ДАЛЬНЬОЇ ДІЇ НА ОСНОВІ СВІТЛОВІДБИТТЯ

Принцип активного лазерного детектування в розглянутій роботі [6] заснований на тому, що оптичні вузли або пристрої часто мають фокальну площину, де розташована візирна сітка або детектор. Принцип світловідбиття призведе до того, що сильний сигнал можна передбачити та виявити, оскільки тілесний кут відбитого випромінювання дуже малий. Отже, використовуючи лазер і відповідний детектор та систему візуалізації, оптичні пристрої можна виявити з високою точністю. Потужність відбитого лазера залежить від кількох параметрів, включаючи дальність до цілі, розбіжність променя, параметри навколишнього середовища, такі як атмосферне розсіювання або турбулентність, а також властивості цілі (або поперечний переріз цілі лазера).

Для розробки системи автори пропонують розглянути та вирішити кілька аспектів і проблем, що стосуються продуктивності активної лазерної системи виявлення дальньої дії. По-перше, потрібна висока енергія лазера, щоб гарантувати гарне співвідношення сигнал-шум відбитого сигналу на великому робочому діапазоні, тобто імпульсний лазер із високою піковою потужністю є кращим, ніж безперервний, де детектор можна синхронізувати, щоб уникнути прийому сильний фоновий сигнал. Крім того, вузький оптичний смуговий фільтр для довжини хвилі лазера необхідний для передачі лише потрібного спектру сигналу та підвищення SNR системи.

По-друге, висока просторова роздільна здатність є критичною проблемою для визначення місцезнаходження та ідентифікації справжніх цілей на великих відстанях, що означає, що слід розглянути датчик зображення з високою роздільною здатністю та більшою фокусною відстанню.

По-третє, і це найважливіше, атмосферну турбулентність і розсіювання не можна ігнорувати зі збільшенням відстані виявлення, і їх необхідно враховувати при оцінці ефективності системи виявлення на великих відстанях. Вплив втрат випромінювання через атмосферне згасання можна послабити подальшим

збільшенням освітленої лазерної енергії. Однак вплив атмосферної турбулентності може бути більш складним, оскільки велика кількість неоднорідностей показника заломлення, викликаних вітрами та конвекцією в атмосфері, може мати значний вплив на хвилю, що поширюється. Це призводить до блукання променя та флуктуацій опромінення, що може спричинити пропадання сигналу. Таким чином, може знадобитися більше часу для реєстрації відбитого випромінювання, і перевага віддається датчику зображення з високою чутливістю.

2.1 Лазерна і коліimatorна системи

Авторами пропонується використовувати високоенергетичний імпульсний лазер як джерело, що може забезпечити випромінювання високої енергії для умов тривалої роботи. Що стосується довжини хвилі лазера, існує багато варіантів, які можна вибрати як довжину хвилі освітлення для активного виявлення, наприклад 532 нм, 1,57 мкм (безпечно для очей), 808 нм (лазерний діод), тощо. В якості освітлювального лазера обрано імпульсний лазер Nd:YAG 532 нм з високою піковою потужністю. Енергія імпульсу, ширина імпульсу, вихідний кут розбіжності та частота повторення становлять відповідно 1 мДж, 10 нс, 2 мрад та 1 кГц. Що стосується режиму освітлення, то в роботі використовується так звана концепція «заливного освітлення», що означає масштабне лазерне освітлення певної цільової області в межах більшого панорамного поля зору. Щоб реалізувати заливне освітлення, для системи лазерного випромінювання потрібна система розширення променя. Крім того, зручніше, якщо кут розбіжності лазерного світла можна гнучко регулювати для різних сценаріїв [6].

Таким чином, також доцільно розробити безперервно змінну систему розширення лазерного променя. На рис. 2.1 показано структуру цієї системи розширення пучка. За допомогою цієї системи кут розбіжності вихідного лазерного променя можна плавно регулювати від $0,03^\circ$ до 5° .

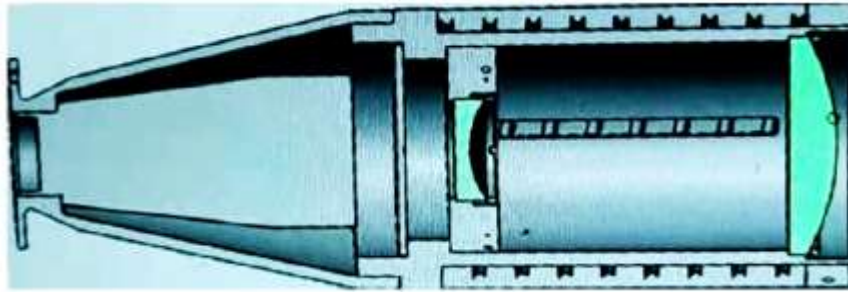


Рисунок 2.1 – Структура системи розширення лазерного променя

2.2 Система формування зображення

Інформація про зображення цілі надається детектором КМОН (комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник). Параметри детектора розроблено на основі вимог, розглянутих у підрозділі 2.1: розмір пікселя $4,5 \text{ мкм} \times 4,5 \text{ мкм}$; діапазон спектрального відгуку від 380 нм до 1100 нм; повна потужність свердловини 12000 e^{-1} ; квантова ефективність при 550 нм становить 50 %; час інтегрування можна регулювати від 1 мкс до 1 с; роздільна здатність 5120×5120 ; частота кадрів 40 кадрів в секунду. Для зменшення фонового сигналу до оптики був приєднаний смуговий оптичний фільтр (смуга пропускання 20 нм) діаметром 50 мм. Як приймальна головка використовується оптична лінза (діафрагма 80 мм) з регульованою фокусною відстанню від 150 мм до 600 мм.

2.3 Практичні можливості системи

На рис. 2.2, а показано приклад варіацій максимальної шкали сірого (в піксельній області 416×416 з ціллю в центрі), отриманих системою виявлення, коли час інтеграції датчика становить 1 мс, 3 мс, 5 мс відповідно. Можна побачити, що відбитий сигнал змінюється та значно мерехтить через ефект турбулентності. Як показано на рис. 2.2, а, сильні коливання сигналу спостерігаються протягом часу експозиції 1 мс, тоді як інші ситуації показують меншу варіацію, що означає, що вплив турбулентності виявляється сильнішим для відбитих сигналів із меншим часом експозиції камери. Щоб підвищити

ймовірність виявлення та зменшити частоту помилкових тривог активної системи виявлення, потрібен збільшений час інтеграції детектора. На рис. 2.2, б показано накопичення зображення з кількома кадрами (150 кадрів), коли час інтеграції датчика становить 1 мс і 5 мс [6].

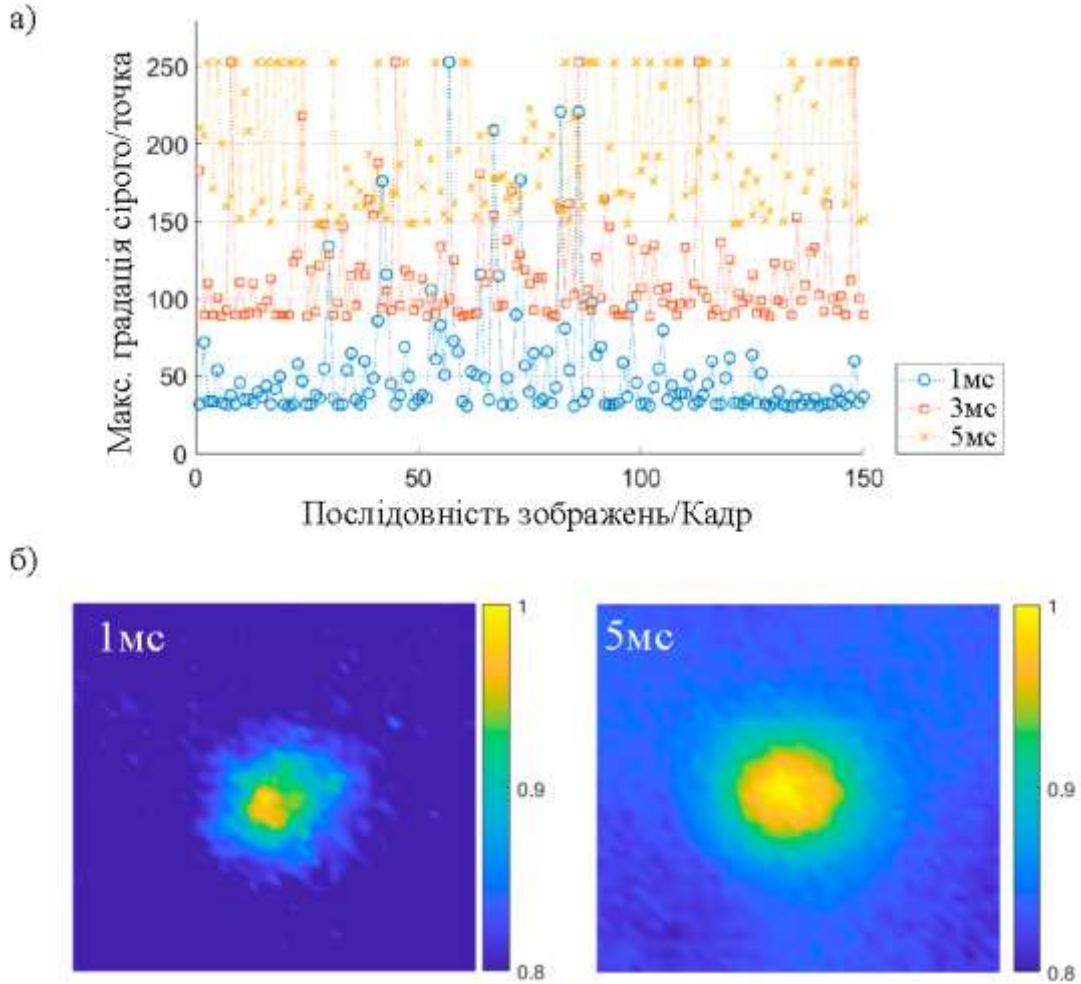


Рисунок 2.2 – Необроблене зображення цілі, отримане від системи виявлення

3 МЕТОД БАГАТОКАНАЛЬНОЇ ОБРОБКИ КАРТИ ПОМІТНОСТІ ПЕРЕД ОБ'ЄДНАННЯМ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Запропонована система [8] працює наступним чином: початкові пари зображень обробляються у восьми спрямованих каналах, щоб отримати спрямовані карти помітності, після чого відбувається новий процес злиття. Після порогового значення цілі розпізнаються. Багатоканальна обробка помітності перед синтезом (БОППС) може працювати як у послідовному, так і в паралельному режимі. Розглянутий метод кращий в обробці зображень високої роздільної здатності. Такі зображення містять більше інформації та є корисними для збільшення ймовірності повторного розпізнавання. Однак це неминуче потребує більше часу, оскільки кількість пікселів у зображеннях збільшується.

3.1 Метод спектральних залишків для виділення помітності

Візуальна увага є важливою характеристикою зорової системи людини. Серед додатків, розроблених на основі зорової уваги, виділення карти помітності, яке вперше було запропоновано Ітті [9] є найбільш репрезентативним. Помітність вимірюється контрастом між одним регіоном та його оточенням. Коли регіон суттєво відрізняється від свого середовища, він має високу помітність. Пропонується велика кількість підходів для виділення помітних областей на зображенні, і більшість із них використовує деякі базові характеристики, такі як інтенсивність, колір для побудови карт помітності. Дослідники також пропонують інші важливі методи аналізу, такі як графічна теорія та підхід спектрального залишку (СЗ) [10]. СЗ має низьку обчислювальну складність і не вимагає попередніх знань під час вилучення цільових карт помітності. Таким чином, обрано СЗ, щоб отримати карти помітності кожного каналу.

Враховуючи вхідне зображення, необхідна така обробка інформації:

$$H(R(f)) = H(L(f)|A(f)), \quad (3.1)$$

де $A(f)$ позначає загальну форму $L(f)$ (логарифмічних спектрів), яка є попередньою інформацією;

$R(f)$ визначена, як спектральний залишок зображення, позначає статистичні сингулярності, подібні до вхідного зображення.

Для наближення форми $A(f)$, вводиться локальний усереднений фільтр. Це матриця $n \times n$, яка визначається як:

$$h_n(f) = \frac{1}{n^2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

Тоді отримаємо:

$$A(f) = h_n(f) * L(f), \quad (3.3)$$

$$R(f) = L(f) - A(f). \quad (3.4)$$

Використовуючи зворотне перетворення Фур'є, ми можемо в просторовій області побудувати вихідне зображення, а саме карту помітності. Карта помітності містить в основному нетривіальну частину сцени. Потім значення кожного пікселя на карті помітності зводиться до квадрата, щоб вказати помилку оцінки. Для кращих ефектів використовується фільтр Гауса $g(x,y)$, щоб згладити різкість. Це можна інтерпретувати наступним чином [10]:

$$S(x,y) = g(x,y) * F^{-1}\{\exp(R(f) + P(f))\}^2, \quad (3.5)$$

де $S(x,y)$ позначає карту помітності зображення;

F^{-1} позначає зворотне перетворення Фур'є;

$P(f)$ є фазовим спектром зображення, який зберігається під час процесу.

2.2 Метод розпізнавання цілей, заснований на виділенні помітності

Лазерна система візуалізації використовується для отримання активного та пасивного зображень. Його схема показана на рис. 3.1. Блок-схема запропонованого алгоритму представлена на рис. 3.2. Потрібні три кадри послідовностей зображень, що складаються з одного активного зображення та двох пасивних зображень (або навпаки) [9].

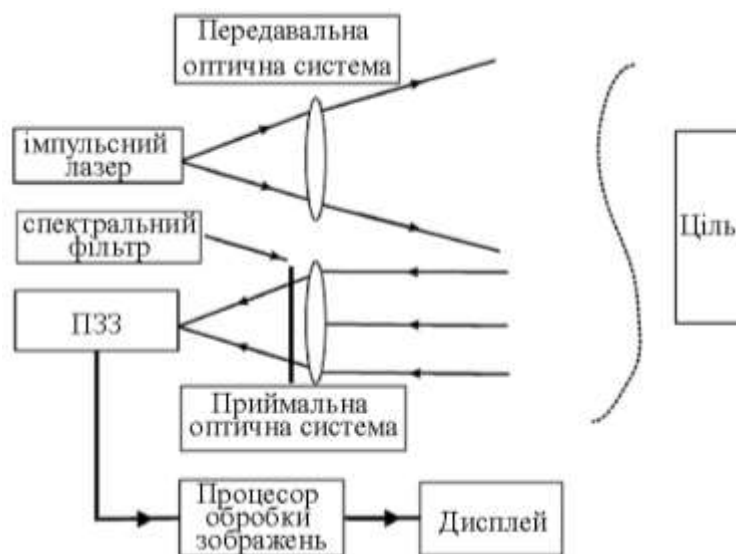


Рисунок 3.1 – Лазерна система візуалізації з ефектом котячого ока.

Система включає об'єktiv камери (Computar Co., H10Z0812DC), прилад із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) (Watec Co. Ltd., частота кадрів = 25 кадрів/с), вузький спектральний фільтр (808 нм), напівпровідниковий лазер із центральною довжиною хвилі 808 нм (середня потужність 1 Вт) і кут огляду 6°. Спектральний фільтр встановлюється між об'єktivом камери та ПЗЗ-матрицею.

Припустімо, що I_{p1} , I_{a2} , I_{p3} означають три кадри послідовності зображень (порядок у часі), отриманих пристроєм. I_{a2} – це активне зображення, I_{p1} і I_{p3} – пасивні зображення. Виконаємо: $I_{d1} = I_{a2} - I_{p1}$, $I_{d2} = I_{a2} - I_{p3}$. Таким чином, ми отримуємо пари різницевих зображень I_{d1} та I_{d2} . Оскільки зображення має два виміри, поверхню інтенсивності різницевого зображення можна створити, відображаючи координати (r,c) пікселя на певний рівень сірого. Згідно з

кубічною фасетною моделлю Гараліка, базова поверхня інтенсивності сірого може бути наближена двовимірною кубічною функцією f у кожному районі зображення. Вона виражається двовимірною кубічною функцією в канонічній формі [11]:

$$f(r, c) = K_1 + K_2r + K_3c + K_4r^2 + K_5rc + K_6c^2 + K_7r^3 + K_8r^2c + K_9rc^2 + K_{10}c^3, \quad (3.6)$$

де $K_i, i = 1, \dots, 10$ – коефіцієнти для двовимірної кубічної функції, вираженої в дискретних ортогональних поліномах.

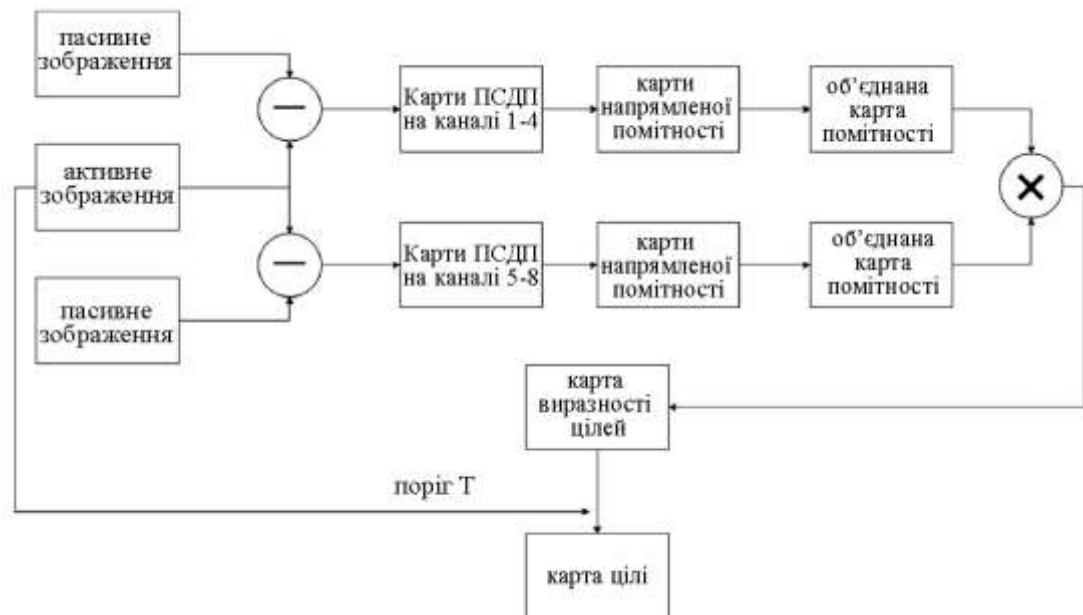


Рисунок 3.2 – Структурна схема способу виявлення

Похідну другого порядку пікселя (x_0, y_0) за напрямком вздовж вектора/ можна виразити як [11]:

$$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial l^2} \Big|_{x_0, y_0} = \left[f_{xx}(x, y) \cos^2 \alpha + 2 f_{xy}(x, y) \times \cos \alpha \cos \beta + f_{yy}(x, y) \cos^2 \beta \right] \times \times \Big|_{x_0, y_0} = 2K_4(x_0, y_0) \cos^2 \alpha + 2K_5(x_0, y_0) \times \cos \alpha \cos \beta + 2K_6(x_0, y_0) \cos^2 \beta, \quad (3.7)$$

де α – кут між віссю l та x ;

β – кут між віссю l та y .

Таким чином, ми отримуємо фільтр похідної спрямованості другого порядку (ФПСДП). Вибираємо вісім спрямованих каналів: канал 1: ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$); канал 2: ($\alpha = 180^\circ$, $\beta = 90^\circ$); канал 3: ($\alpha = 90^\circ$, $\beta = 0^\circ$); канал 4: ($\alpha = 270^\circ$, $\beta = 180^\circ$); канал 5: ($\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$); канал 6: ($\alpha = 225^\circ$, $\beta = 135^\circ$); канал 7: ($\alpha = 135^\circ$, $\beta = 45^\circ$); канал 8: ($\alpha = 315^\circ$, $\beta = 225^\circ$); оперуючи зображеннями відмінностей, щоб отримати карти ФПСДП. У цьому алгоритмі d_1 обчислюється в каналах 1–4, а d_2 обчислюється в каналах 5–8. Карти ПСДП з різних спрямованих каналів позначаються як.

Разом зі збільшенням відстані виявлення між системою візуалізації та ціллю, ціль із ефектом котячого ока на отриманому зображенні зазвичай має такі властивості, як низьке відношення сигнал/шум, малий розмір і недоступна інформація про форму. Крім того, розсіювання енергії цілі в усіх напрямках має характеристику точкового поширення. Отже, мала ціль не чутлива до напрямку. Тому морфологічний метод [11] можна використовувати для роботи з відфільтрованим зображенням (карти ФПСДП) у кожному напрямку з метою подальшого усунення залишкового шуму. Підхід СЗ як алгоритм вилучення карти помітності використовується для виділення цілі. У нашому алгоритмі карти помітності позначаються як $S_i(x, y)$, $i \in 1, 2, \dots, 8$ відповідно.

Після цього, щоб об'єднати 8 карт помітності ефективно та швидко, висувається новий підхід. Він розділений на два етапи. 1 етап – обчислення об'єднаних карт за допомогою рівняння:

$$S_{об} = \sqrt{\sum_g S_g \times (\perp S_g)}, \quad (3.8)$$

де g представляє кількість ортогональних груп напрямків;

S_g – карта напрямленої помітності;

$\perp S_g$ – ортогональна направлена карта помітності S_g .

В алгоритмі об'єднана карта помітності пар різницевих зображень обчислюється за допомогою карт спрямованої помітності з каналів 1–4 і каналів 5–8 відповідно. Вони позначаються як S_{fuse_d1} та S_{fuse_d2} .

2 етап – виконується попіксельне множення S_{fuse_d1} і S_{fuse_d2} для отримання карти помітності цілі. Цей процес описується наступним чином:

$$S_{end} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 S_i \times S_{i+2}} \times \sqrt{\sum_{j=5}^6 S_j \times S_{j+2}}. \quad (3.9)$$

Описаний вище процес розрахунку в каналі кожного напрямку є незалежним. Тому це забезпечує зручність паралельного виконання такої роботи. Для цього можна застосувати технологію багатоядерних паралельних обчислень. Карта спрямованості обчислюється в різних ядрах, а потім збирається для об'єднання. У такому випадку час роботи буде значно скорочений. Після цього відбувається сегментація карти видимості цілі, щоб виділити регіони, де існують підозрілі цілі. З придушенням фону та посиленням цілі за допомогою описаної вище обробки, ефект котячого ока має максимальну інтенсивність у своїй локальній області зображення. Між тим, такі цілі також є найяскравішими в пасивних зображеннях. Враховуючи це, початкове активне зображення I_{a1} розглядається як посилення цільової сегментації. Рівень сірого S_{end} налаштовано на рівень I_{a1} . Пізніше для виявлення справжньої цілі застосовано метод порогової сегментації [12].

Поріг T розраховується наступним чином:

$$T = \frac{mI_{a1_{\max}} + nI_{a1_{\text{сеп}}}}{m + n}, \quad (3.10)$$

де $I_{a1_{\max}}$ – максимальне значення;

$I_{a1_{\text{сеп}}}$ – середнє значення активного зображення I_a , і є двома константами.

Їх можна регулювати відповідно до різної інтенсивності світла. Після численних експериментів було встановлено $m = 4, n = 1$.

Нарешті, ціль можна легко отримати шляхом визначення порогового значення для карти помітності $S_{кін}$. Цей процес описується як:

$$S_{кін}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } S_{кін}(x, y) \geq T \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases} . \quad (3.11)$$

4 РОЗПІЗНАВАННЯ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ТОПОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ

Для оцінки зображень відбитого сигналу також можливе використання топологічних методів. Існує група популярних топологічних приладів, які продемонстрували високу ефективність при дослідженні складних систем і оптичних сигналів.

4.1 Опис складових частин лазерної системи реєстрації оптики

Лазерна система реєстрації оптики має складатись з трьох складових частин: оптичної, механічної та електронної (рис. 4.1).

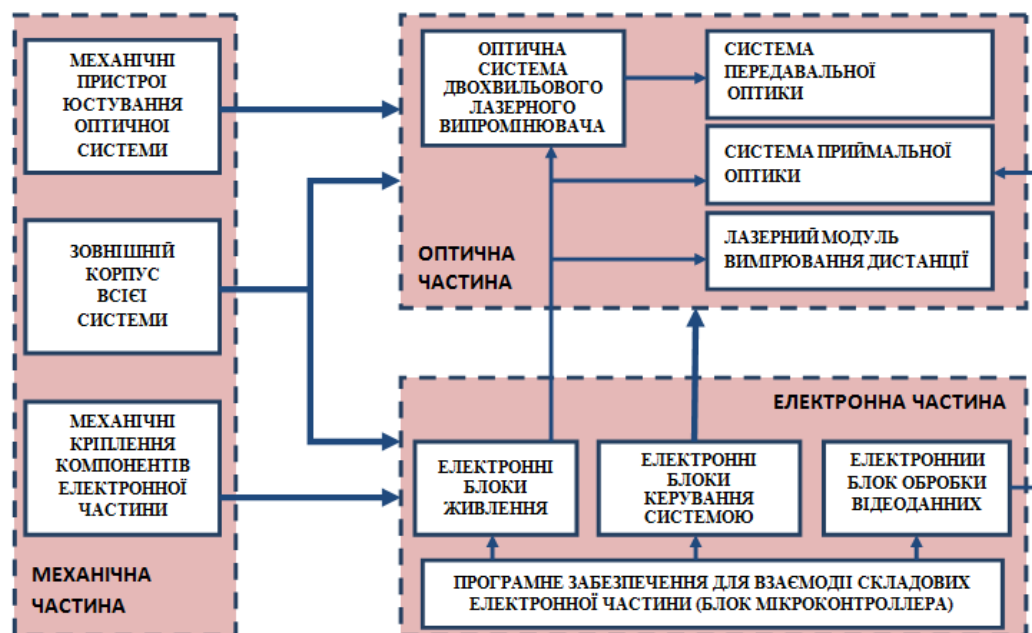


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи реєстрації оптики

До складу оптичної частини лазерної системи входять [7]:

- система передавальної оптики (оптичний коліimator (BE02-05-B, виробник Thorlabs, Німеччина);
- суматори оптичного випромінювання);

- система приймальної оптики (оптичний коліматор AC508-150-A, виробник Thorlabs, Німеччина);
- відеокамера з 30-ти кратним об'єктивом (виробник Китай);
- спектральні фільтри (виробник Thorlabs, Німеччина);
- оптична система двохвильового лазерного випромінювача на основі поєднання лазерних випромінювачів (виробник Sheumann Laser, США) з довжинами хвиль від 800 нм до 1500 нм;
- лазерний модуль вимірювання дистанції (RF1500A, виробник Тайвань).

До складу електронної частини лазерної системи входять:

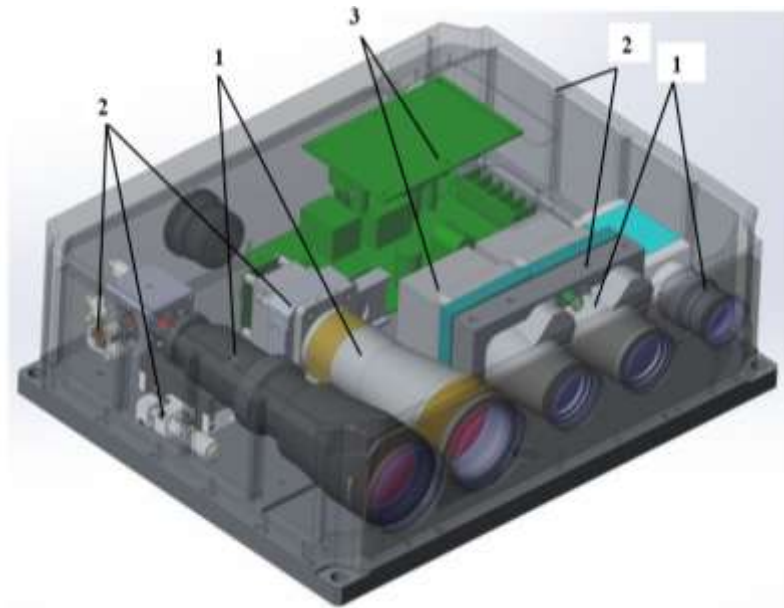
- електронні блоки живлення лазерів фотоприймального пристрою, електронні блоки керування системою, та зовнішнім зв'язком;
- електронні блоки стабілізації режимів роботи лазерів;
- електронний блок обробки відеоданих;
- програмне забезпечення для взаємодії складових електронної частини системи.

До складу механічної частини лазерної системи входять:

- механічні пристрої юстування компонентів оптичної частини системи;
- механічні кріплення компонентів електронної частини системи;
- зовнішній корпус всієї системи.

Ескіз загального вигляду лазерної системи реєстрації оптики зображено на рисунку 4.2.

Розглянемо принцип реєстрації оптичного об'єкта лазерною системою реєстрації в спрощеному вигляді (рис. 4.3). Лазерне випромінювання від джерела (зондуючий промінь), потрапляє в об'єктив прицілу або іншого оптичного приладу, пройшовши через діафрагму, яку утворюють деталі корпусу самого приладу. У фокальній площині об'єктива розташована прицільна або далекомірна сітка. Основна частина падаючого лазерного випромінювання проходить крізь сітку, потрапляє в окуляр, а потім, пройшовши складну оптичну систему ока, потрапляє на рецепторний апарат.



1 – елементи оптичної частини системи; 2 – елементи механічної частини системи; 3 – елементи електронної частини системи.

Рисунок 4.2 – Ескіз загального виду лазерної системи реєстрації оптики

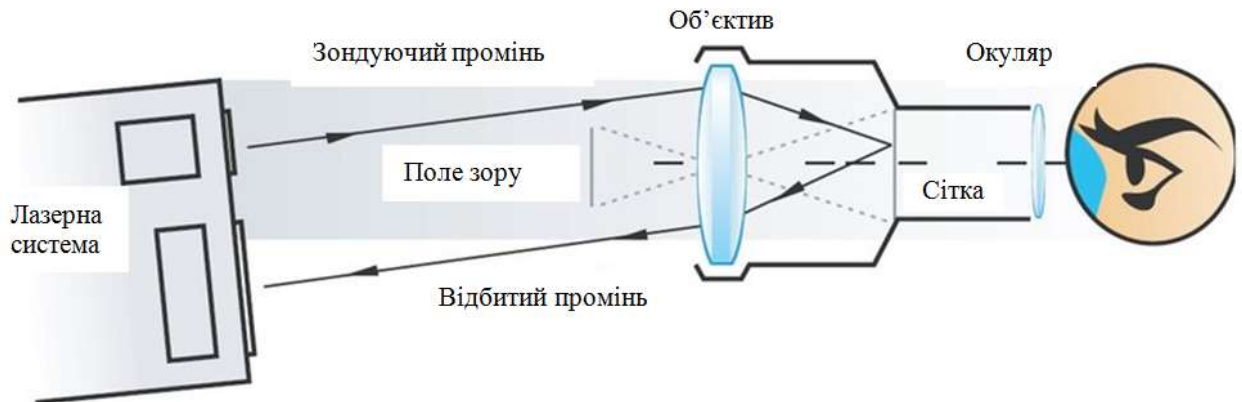


Рисунок 4.3 – Схематичне зображення принципу роботи лазерної системи реєстрації оптики

Але деяка частина падаючого лазерного випромінювання відбивається від сітки і знову проходить через об'єктив і повертається до джерела випромінювання паралельно падаючому випромінюванню. Також деяка частина лазерного випромінювання відбивається від зорової частини сітківки і проходить зворотний шлях крізь оптичну систему ока і оптичного приладу, і також

повертається до джерела випромінювання. В такому разі, якщо в систему виявлення оптики задіяти інфрачервону камеру, то на екрані комп'ютера або дисплея, можливо побачити інтенсивний відблиск, тим самим виявити позицію умовного противника.

Для того щоб спостерігач не міг побачити, що його виявили, в системах виявлення застосовуються лазерні випромінювачі ближнього інфрачервоного діапазону, яке людське око не бачить. Але й існують методи боротьби з таким системами, наприклад, використання світлофільтрів, які не пропускають ІЧ випромінювання, або використання лінзи довільної форми для зміщення зображення [13].

Тому запропонована в роботі лазерна система базується на двох принципах:

- по-перше, фіксування відблисків від оптичних пристроїв;
- по-друге, на фіксуванні за допомогою високочутливого фотодіода малоінтенсивного випромінювання, що в свою чергу ускладнює роботу систем протидії запропонованій лазерній системі.

4.1.1 Оптична частина

Робота лазерної системи базується на випромінюванні лазерних діодів (рис. 4.4). Характеристики лазерних діодів наведено в таблиці 4.1.

Основним конструкторським рішенням оптичної частини лазерної системи реєстрації оптики є підсумування випромінювання двох лазерних діодів з різною довжиною хвиль: від 800 нм до 1500 нм для більш широкого діапазону довжин хвиль зондування, та неможливості умовного противника підібрати одночасно декілька світлофільтрів для протидії, за допомогою оптичного суматора (поляризаційного кубика). Дана ідея використовується вперше в системах даного типу. При цьому напівпровідникові лазери мають на виході розподілення поля в формі еліпса [14–15], тому діоди орієнтуються в просторі, так щоб великі осі еліпса співпадали з пропусканням поляризації кубика (рис. 4.5).



Рисунок 4.4 – Фото лазерних діодів

Таблиця 4.1 – Характеристики лазерних діодів

Модовий склад випромінювання	Тип корпусу	Потужність, Вт	Ширина емітера, мкм
Багатомодовий	C-Mount	3	100
Багатомодовий	C-Mount	3	100

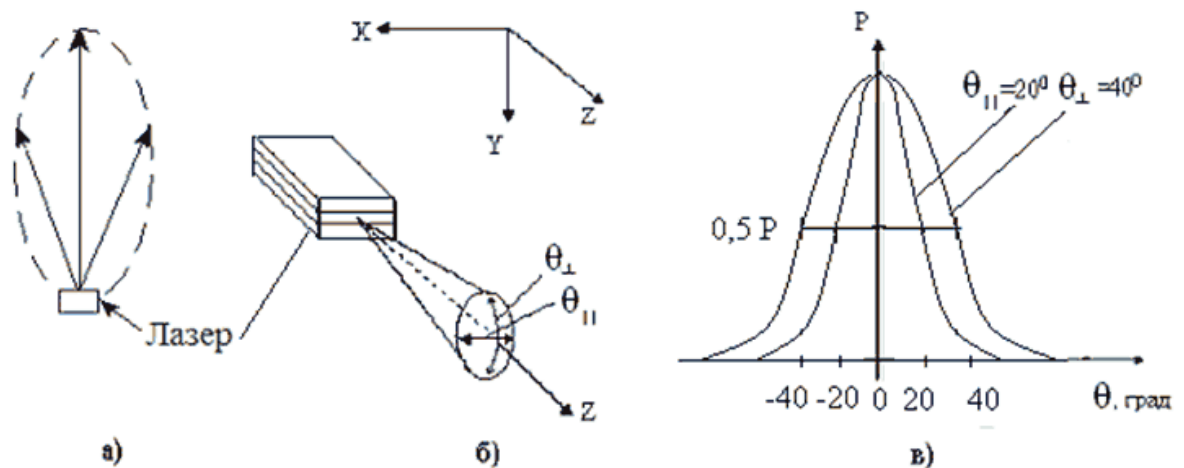


Рисунок 4.5 – Діаграма направленості та характер оптичного випромінювання лазерного діода

Після чого, все випромінювання попадає на систему передавальної оптики BE02-05-B, яку зображено на рисунку 4.6.



Рисунок 4.6 – Фото системи передавальної оптики

Характеристики системи передавальної оптики наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Характеристики системи передавальної оптики

Кратність (збільшення)	Вхідна апертура, мм	Максимальний вхідний діаметр пучка, мм	Покриття оптики (діапазон довжин хвиль), нм
2x – 5x	Ø8	Ø4	650 – 1050

Ескіз системи передавальної оптики з лазерними діодами та суматором випромінювання зображено на рисунку 4.7.

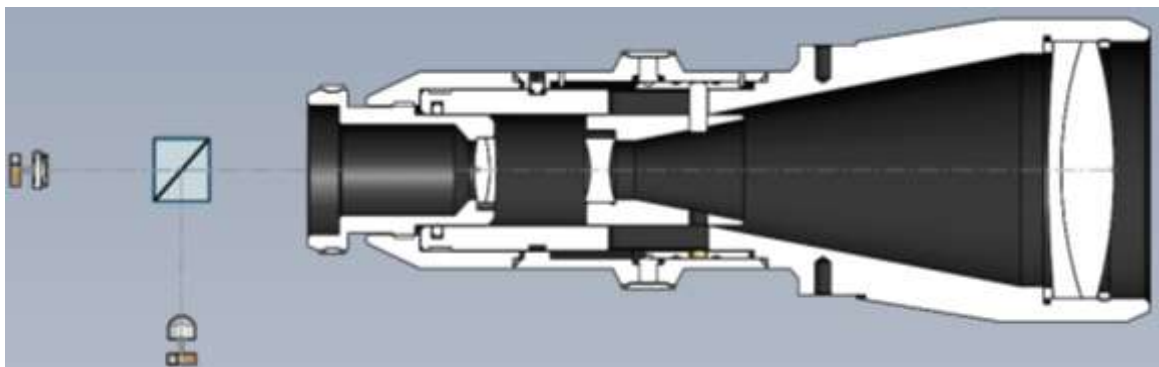


Рисунок 4.7 – Схема двохвильового лазерного випромінювача з коліматором BE02-05-B

Іншою складовою оптичної частини лазерної системи є система приймальної оптики, де основними елемента є лінза AC508-150-A (рис. 4.8), та

лавинний фотодіод, основним конструкторським рішенням є правильний підбір фокусної відстані; розрахунки та дослідження проведені в розділі 3, для розташування її в корпусі таким чином, щоб все відбите випромінювання фокусувалось на активній області фотодіода. Також ще однією особливістю конструкції є вставка в модуль світлофільтрів, які призначені для відсікання шкідливого випромінювання (випромінюванням діапазону довжин хвиль, які не відповідають лазерним діодам), світлофільтри вбудовуються таким чином, що їх можливо змінювати. Ескіз системи приймальної оптики зображено на рисунку 4.9.



Рисунок 4.8 – Фото коліматора приймальної частини

Ще одним елементом оптичної частини системи є імпульсний лазер RF1500A, основне призначення якого – це вимірювання дистанції до виявленої цілі, тобто далекометрування. Але для цього, потрібен не тільки сам лазер, а й оптична система колімації випромінювання, приймальна система випромінювання, електронне забезпечення для обробки сигналів, лазер з усіма перерахованими елементами (рис. 4.10).

Завдяки можливості зміни збільшення кратності коліматора BE02-05-B є можливість зміни поля зору передавальної оптики [16–18], що забезпечує концентрацію корисного сигналу в просторі для зондування.

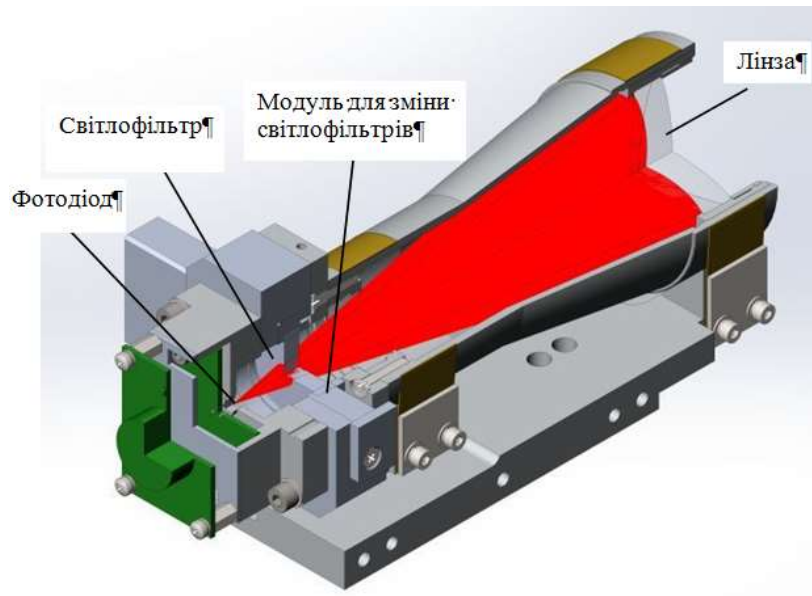


Рисунок 4.9 – Модуль приймальної системи оптичної частини



Рисунок 4.10 – Імпульсний лазер з оптичною та електронною системою

Відбитий від об'єктів (оптичних пристроїв) оптичний сигнал фіксується за допомогою приймальної оптики та високочутливого фотодіода у складі фотоприймального вузла. Таким чином, корисний оптичний сигнал перетворюється на логічний електричний сигнал та надходить до електронного блоку керування системою, який у свою чергу обробляється програмним забезпеченням та видається на зовнішній комп'ютер як сигнал наявності цілі в просторі, що сканується. Завдяки наявності відеосигналу з підключеної

відеокамери на екрані комп'ютера є можливість отримати візуальну інформацію про місце розміщення (розташуванні) цілі.

4.1.2 Механічна частина

Корпус лазерної системи буде переглядатись на етапі створення дослідного зразку, так як тоді буде оптимізовано компоновку всіх частин для мінімальних габаритів лазерної системи виявлення оптики. На даному етапі система має загальний вигляд зображений на рисунку 4.2. Але основним конструкторським рішенням механічної частини лазерної системи є забезпечення юстування лазерних діодів у просторі по двом координатам з мікрометричним кроком, що необхідно для процедури підсумовування лазерного випромінювання, тобто випромінювання діодів повинно падати чітко на середину грані поляризаційного куба під кутом 90° (перпендикулярно грані). Крім цього, коліматор передавальної оптики оснащується юстувальною системою з мікрометричним кроком по двом координатам, для налаштування його положення в просторі таким чином, щоб випромінювання після поляризаційного кубика попало чітко в центр вхідної лінзи. Для забезпечення саме цих умов і потрібні юстирувальні пристрої [19–21], зображені на рисунку 4.11.

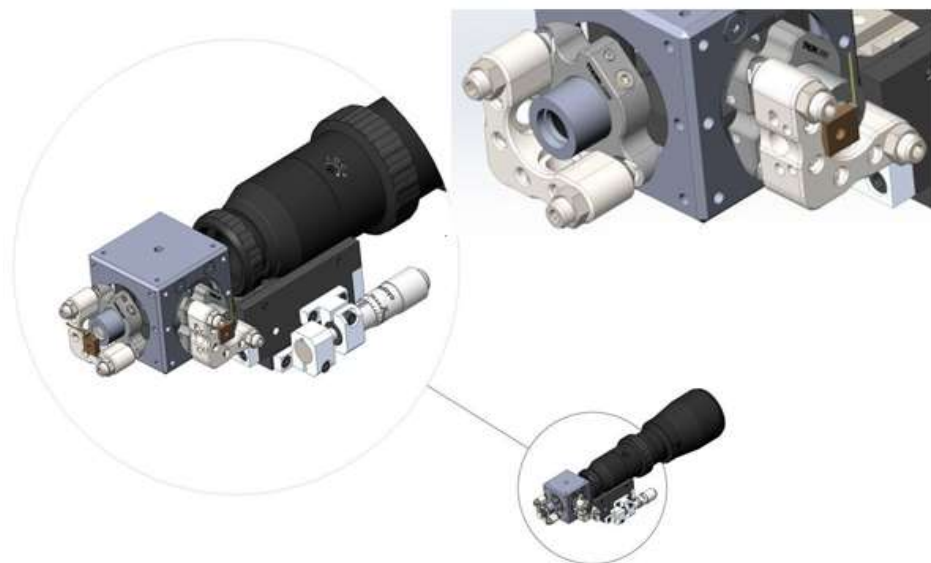


Рисунок 4.11 – Зображення механічних юстирувальних вузлів

4.2 Розрахунок параметрів та характеристик фотоприймального вузла системи приймальної оптики

4.2.1 Енергетичний розрахунок

Метою енергетичного розрахунку є визначення світлосили, необхідної для забезпечення вимог до інтенсивності випромінювання та зображення.

При розгляді питань передачі світлової енергії оптичними приладами зручно оперувати поняттям світлосили H , що характеризує здатність оптичного пристрою створювати більш-менш світле зображення. Світлосила визначається як відношення освітленості E' , вимірної на поверхні зображення до яскравості B предмета [22–23]:

$$H = E' / B. \quad (4.1)$$

Світлосила системи розраховується за різними формулами в залежності від того, з якими предметами ми маємо справу. Для кожного оптичного приладу існує мінімальний розмір предмета y_0 , при якому цей предмет ще може бути відмінний від геометричної точки. Всякий предмет, що спостерігається в оптичному приладі, проєктується на площину предметів у вигляді двомірного образу. Якщо обидва розміри цього способу більше y_0 , предмет називаємо майданчиковим і для нього справедливі такі формули:

$$H = \pi\tau \left(\frac{\sin \alpha}{\beta} \right)^2, \quad (4.2)$$

$$H = \pi\tau \left(\frac{n' \sin \alpha'}{\beta} \right)^2, \quad (4.3)$$

де τ – коефіцієнт пропускання оптичного каналу;

β – лінійне збільшення оптичної системи;

n, n' – показники заломлення середовищ в просторі предметів і зображень;

α, α' – апертурні кути в просторі предметів і зображень.

У разі, коли предмет знаходиться так далеко від приладу, що його зображення практично лежить в задній фокальній площині, а лінійне збільшення β дорівнює нулю, наведені формули (4.2) – (4.3) спростяться:

$$H = \frac{1}{4} \pi \tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \left(\frac{D}{f'} \right)^2. \quad (4.4)$$

Якщо один розмір предмета більше y_0 , а інший – менше y_0 , то предмет лінійний. В цьому випадку слід користуватися формулами:

$$H = \pi \tau \frac{\sin^2 \alpha}{\beta}, \quad (4.5)$$

$$H = \pi \tau \beta \left(\frac{n' \sin \alpha'}{n} \right)^2. \quad (4.6)$$

Лінійні предмети зустрічаються порівняно рідко в практиці оптичного приладобудування. Прикладом можуть служити тонкі поділу шкал.

У разі, коли обидва розміри менше y_0 предмет точковий. При точкових предметах діють формули:

$$H = \pi \tau \sin^2 \alpha, \quad (4.7)$$

$$H = \pi \tau \left(\frac{n' \beta \sin \alpha'}{n} \right)^2. \quad (4.8)$$

З точковими предметами ми зустрічаємося при розгляданні зірок за допомогою астрономічних приладів.

Слід також враховувати, що наведені співвідношення справедливі тільки для центральної частини поля. З віддаленням від оптичної осі світлосила знижується за законом Ламберта:

$$H = H_0 \cos^4 \omega'. \quad (4.9)$$

Одним із прикладів енергетичного розрахунку є визначення діаметра

вхідної зіниці фотоелектричної системи за інтегральними характеристиками приймача. Принципова схема оптичної фотоелектричної системи показана на рисунку 4.12. Приймач зображення зміщений відносно площини зображення джерела випромінювання [24–25].

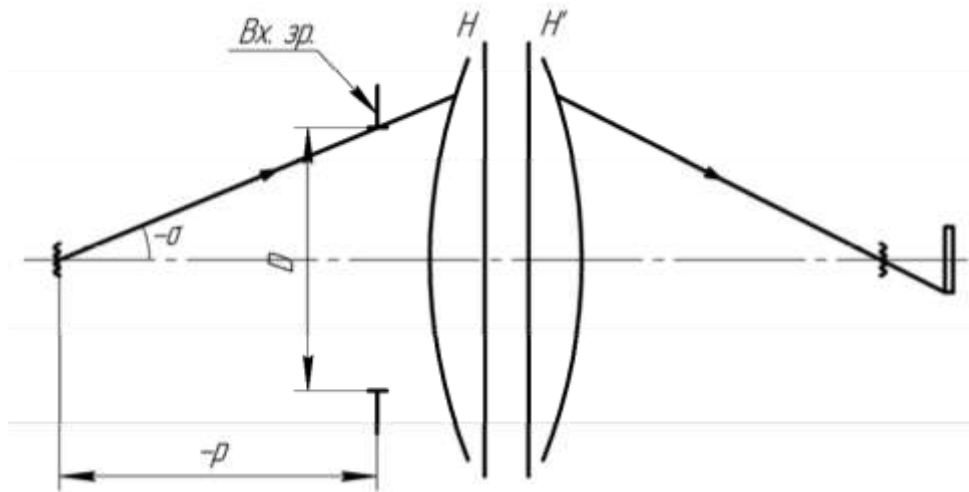


Рисунок 4.12 – Схема ходу променів в фотоелектричній системі

Діаметр вхідної зіниці повинен бути визначений з умови, що реакція приймача на потік випромінювання повинна бути не менше:

$$i_{\Pi_{\min}} \quad (4.10)$$

де κ_{Π} – коефіцієнт, що враховує перевищення корисного сигналу над граничним;

i_{Π} – сигнал, відповідний до порогу чутливості приймача.

Якщо джерело має однакову в усіх напрямках енергетичну яскравість L , то до вхідної зіниці оптичної системи буде надходити потік випромінювання [26–27]:

$$\Phi = \tau_a \pi \cdot L_{\text{дж}} Q_{\text{дж}} \sin^2 \sigma, \quad (4.11)$$

де τ_a – коефіцієнт пропускання атмосфери;

$Q_{\text{дж}}$ – площа джерела випромінювання.

Нехай весь потік потрапляє на приймач, тоді:

$$\Phi' = \pi \tau_a \tau_{oc} L_{ож} Q_{ож} \sin^2 \sigma, \quad (4.12)$$

де τ_{oc} – коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Реакція приймача i_{min} буде дорівнювати:

$$i'_{min} , \quad (4.13)$$

де S – інтегральна чутливість приймача.

Знаходимо передню апертуру оптичної системи:

$$\sin \sigma = \sqrt{\frac{i_{min}}{S \pi \tau_a \tau_{oc} L_{ож} Q_{ож}}}. \quad (4.14)$$

Діаметр вхідної зіниці дорівнює:

$$D = 2p \cdot tq \sigma. \quad (4.15)$$

Інший приклад енергетичного розрахунку. Розглянемо оптичну систему, що сприймає випромінювання від поверхні, освітленої лазером, принципова схема якої показана на рисунку 4.13.

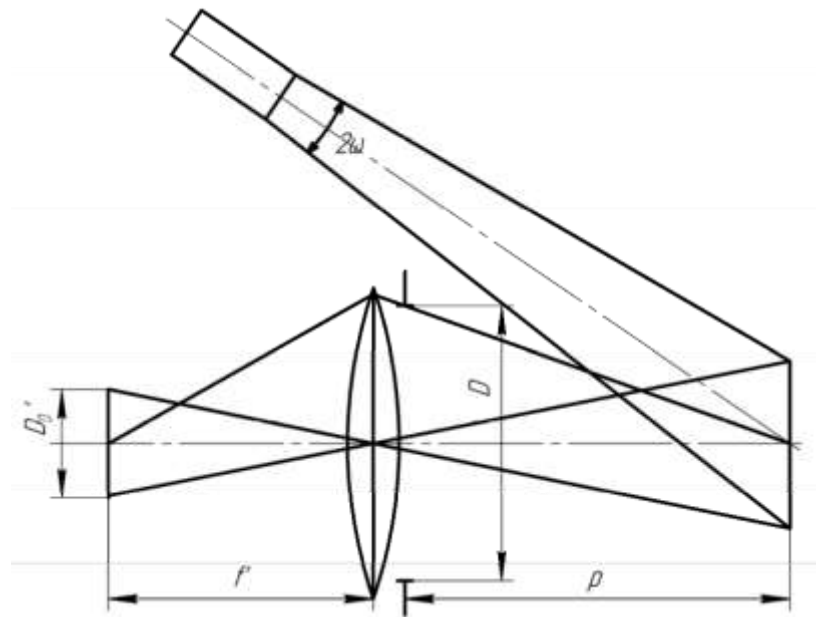


Рисунок 4.13 – Хід променів відбитого лазерного випромінювання від поверхні предмету

Лазер з кутом розходження 2ω освітлює поверхню, що знаходиться на відстані p від оптичної системи. Можна прийняти, що тілесний кут Ω дорівнює [28]:

$$\Omega = \pi\omega^2. \quad (4.16)$$

Випромінювання в тілесному куті Ω рівномірне. Тоді сила випромінювання в напрямку осі лазера дорівнює:

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\pi\omega^2}, \quad (4.17)$$

де Φ_e – потік випромінювання лазера.

При нормальному падінні променів на освітлювану поверхню, освітленість E_e дорівнює:

$$E_e = \tau_a \frac{I_e}{p^2}, \quad (4.18)$$

де τ_a – коефіцієнт пропускання атмосфери.

Вважаючи, що освітлювана поверхня є поверхнею Ламберта з коефіцієнтом відбиття ρ , знаходимо енергетичну яскравість поверхні:

$$L_t = \frac{\rho E_e}{\pi}. \quad (4.19)$$

Діаметр поверхні, що освітлюється лазером дорівнює:

$$D_o = 2\omega r. \quad (4.20)$$

Збільшення оптичної системи при значній відстані p можна вважати рівним:

$$\beta = \frac{f'}{p}. \quad (4.21)$$

Діаметр зображення в площині приймача:

$$D'_o = D_o \beta. \quad (4.22)$$

З урахуванням того, що лазерна система повинна працювати на відстані до 3000 м, а фокусна відстань лінзи склейки (коліматор приймальної оптики) дорівнює 150 мм, то діаметр плями випромінювання в фокусі лінзи дорівнює 200 мкм.

Якщо зображення вписується в світлочутливу поверхню приймача, то необхідний відносний діаметр приймальної оптичної системи дорівнюватиме:

$$\frac{D}{f'} = 2 \sqrt{\frac{i_{min}}{\tau_a \tau_{c\phi} \tau_{oc} L_e Q_o' S(\lambda)}}, \quad (4.23)$$

де τ_a , τ_{cf} , τ_{oc} – коефіцієнти пропускання атмосфери, світлофільтрів, оптичної системи;

Q_0' – площа зображення об'єкта;

$S(\lambda)$ – абсолютна спектральна чутливість приймача до монохроматичного випромінювання лазера.

Площа фоточутливого елемента складає 200 мкм, отже виходячи з формули (4.23) діаметр приймальної оптичної системи дорівнює 48 мм, а з урахуванням усіх допусків діаметр коліматора АС508-150-А дорівнює 58 мм.

4.2.2 Розрахунок характеристик випромінювання при лазерному зондуванні на різних дистанціях

Припустимо, що P_l – вихідна потужність лазера, τ_1 – коефіцієнт пропускання оптичної системи передавального каналу лазерної системи виявлення оптики, який включає систему формування випромінювання і систему виведення випромінювання з приладу. Тоді потужність лазерного випромінювання на виході приладу $P_{вих}$ складає [29–31]:

$$P_{вих} = P_l \tau_1. \quad (4.24)$$

Далі пучок випромінювання лазера проходить шар середовища поширення (як правило, атмосфери), товщина якого L км дорівнює відстані до цілі, і розсіюється на цілі. Частина розсіяного випромінювання повертається назад і потрапляє в об'єктив фотоприймального пристрою (ФПП).

Зробимо наступні припущення.

1. Середовище поширення випромінювання (атмосфера) однорідне, втрати в ньому розподілені рівномірно по довжині напрямку пучка випромінювання від лазерної системи до цілі і характеризується коефіцієнтом втрат $\alpha_a, \text{км}^{-1}$ в експоненціальному законі Бугера-Ламберта-Бера.

2. Екранування цілі сторонніми об'єктами, що знаходяться на місцевості (дерева, кущі, дроти, будови і т.д.), а також іншими цілями відсутнє.

3. Розсіювання випромінювання ціллю є дифузним і підкоряється закону Ламберта [29]:

$$P(\phi) = \rho_{\psi} P_0 \cos \phi, \quad (4.25)$$

де ρ_{ψ} – коефіцієнт розсіювання випромінювання ціллю;

P_0 – потужність випромінювання, що впало на ціль;

$P(\phi)$ – потужність випромінювання, розсіюваного ціллю в одиниці тілесного кута під кутом ϕ до нормалі поверхні, що віддзеркалює.

Ціль можна уявити у вигляді деякої еквівалентної плоскої поверхні, розташованої перпендикулярно осі пучка випромінювання, при цьому в загальному випадку в подальші формули слід вводити множник $\cos^2 \phi$. Можливі відхилення характеристик розсіювання від закону Ламберта можна врахувати введенням відповідного коефіцієнта κ_r .

4. Всі коефіцієнти (α_a , ρ_{ψ} та інші у міру їх появи) визначені для робочої довжини хвилі лазера.

5. Розміри цілі (мішені) багато менше відстані від лазерної системи до неї, тобто мішень можна вважати точковим джерелом, яке розсіює (віддзеркалює) випромінювання, що потрапляє на нього.

6. Розміри цілі (мішені) більше розмірів плями випромінювання лазера, яке потрапляє на ціль. Якщо ціль менше плями, це може бути враховано окремо введенням коефіцієнта κ_{ψ} .

7. Поле зору приймального каналу більше розбіжності випромінювання ЛД, що забезпечує повне попадання зображення плями, що формується на цілі, на фоточутливу площу ФПП.

Потужність випромінювання, що улучило на ціль, P_{ψ} при цих умовах дорівнює:

$$P_u = P_{ВИХ} \exp(-\alpha_a L) = P_l \tau_1 \exp(-\alpha_a L). \quad (4.26)$$

Потужність прийнятого випромінювання $P_{ФПП}$, що розсіяне ціллю, повторно пройшло через шар атмосфери товщиною L км і що улучило на об'єктив ФПП лазерної системи при цих припущеннях, можна визначити формулою:

$$P_{ФПП} = P_{ц} \rho_{ц} k_{\rho} k_{ц} \exp(-\alpha_a L) \left(\frac{d}{2L}\right)^2, \quad (4.27)$$

де k_{ρ} – коефіцієнт, що характеризує просторовий розподіл відбитого ціллю випромінювання, тобто, відхилення від закону Ламберта (якщо ціль розсіює випромінювання відповідно до цього закону, $k_{\rho} = 1$, в протилежному випадку $k_{\rho} > 1$);

$k_{ц}$ – коефіцієнт, що характеризує долю повної енергії випромінювання, яка потрапляє на ціль;

d – діаметр вхідної зіниці об'єктиву приймального каналу (який може не збігатися в деяких конструкціях з діаметром об'єктиву).

Якщо припустити, що на елементах конструкції приймального каналу немає зрізання пучків випромінювання, що потрапляють на фотоприймальну площадку ФПП (в першу чергу, діаметр плями, що формується об'єктивом ФПП, менше розмірів приймальної площадки або діафрагми, яка обмежує поле зору приймального каналу), то величину сигналу на виході ФПП $U_{ФПП}$ можна визначити по формулі:

$$U_{ФПП} = P_{ФПП} \tau_2 \cdot S_{ФПП}, \quad (4.28)$$

де τ_2 – коефіцієнт пропускання оптичної системи приймального каналу;

$S_{ФПП}$ – чутливість фотоприймального пристрою при оптимальних значеннях смуги пропускання електронного тракту і відношення сигнал-шум.

Прийнято вважати, що сигнал на ФПП виділяється електронним трактом, якщо його величина перевершує рівень шумів в три і більше разів.

Підставляючи послідовно значення, які визначені формулами (4.24) – (4.27) у формулу (4.28), отримаємо:

$$U_{\text{ФПП}} = P_{\text{л}} \tau_1 \tau_2 \rho_{\text{ц}} \kappa_{\text{р}} \kappa_{\text{ц}} \left(\frac{d}{2L}\right)^2 S_{\text{ФПП}} \exp(-2\alpha_a L). \quad (4.29)$$

Рівняння (4.29) є основним для розрахунку характеристик лазерних далекомірів лазерної системи виявлення оптики. Його інколи називають рівнянням дальності і записують у такому вигляді:

$$L^2 = \frac{P_{\text{л}} \tau_1 \tau_2 \rho_{\text{ц}} \kappa_{\text{р}} \kappa_{\text{ц}} S_{\text{ФПП}} d^2}{U_{\text{ФПП}}} \exp(-2\alpha_a L). \quad (4.30)$$

Відзначимо, що в явному вигляді відносно дальності L до цілі трансцендентне рівняння (4.30) не вирішується, оскільки в його правій частині ця величина знаходиться в показнику експоненти. Тому рівняння (4.29) і (4.30) вирішуються числовими або наближеними методами, наприклад, методом послідовних наближень.

За формулою (4.29) виробляють розрахунок сигналів, що отримуються на виході ФПП при заданих характеристиках далекоміра, атмосфери і цілі, а за формулою (4.30) – розрахунок дальності дії лазерної системи при заданих характеристиках ФПП, атмосфери і цілі.

Вкажемо, що по формулі (4.14) визначаються граничні дальності, при яких сигнали ФПП при заданих зовнішніх умовах перевищують шум в задану кількість разів, тобто, воно визначає порогові умови формування сигналів на ФПП.

Таким чином для з урахуванням усіх перерахованих чинників та рівняння (4.30) для роботи системи на відстані 1000 м потужність лазерних діодів повинна складати не менше 0,5 Вт, на 2000 м – 1,1 Вт, на відстані 3000 м – 2,0 Вт. Таким чином закуплені діоди потужністю 3 Вт.

4.2.3 Теоретичний розрахунок сигнал - шум на вході фотоприймача

Одним із шляхів створення швидкодіючих фотоприймачів з високою чутливістю є використання лавинного пробою, зокрема, створення лавинних фотодіодів (рис. 4.14)

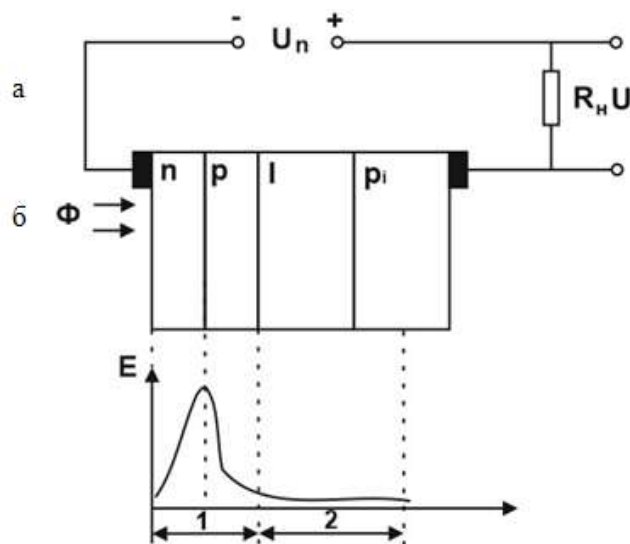
Якщо поле в активній зоні фотодіода велике і енергія, придбана фотоносіями струму (електронами і дірками) в цьому полі, перевищує енергію утворення електронно-дірчатих пар, то відбувається лавиноподібний процес розмноження носіїв. Процес розмноження починається з генерації носіїв під дією випромінювання: утворюється фотодіод з лавинним розмноженням носіїв.

Посилення первинного фотоструму в лавинному фотодіоді визначається коефіцієнтом лавинного розмноження:

$$K_i = \frac{I_\phi}{I_{\phi 0}}, \quad (4.31)$$

де I_ϕ – струм на виході фотодіода з урахуванням розмноження;

$I_{\phi 0}$ – струм при відсутності розмноження.



а – структура; б – розподіл поля в структурі;

1 – зона сильного поля; 2 – збіднена зона.

Рисунок 4.14 – Лавинний фотодіод

Таким чином, коефіцієнт лавинного розмноження у лавинному фотодіоді є коефіцієнтом посилення фотоструму.

Відомо, що коефіцієнт розмноження залежить від напруги на переході:

$$K_i = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{проб}}\right)^m}, \quad (4.32)$$

де $U_{проб}$ – напруга пробою;

U – напруга на p - n -переході;

m – коефіцієнт, що враховує вид і тип провідності напівпровідникового матеріалу ($m = 1,5 - 2,0$ для кремнія p -типу; $m = 3,4 - 4,0$ – для кремнія n -типу).

В цьому випадку ВАХ лавинного фотодіода можна представити у вигляді:

$$I_\phi = \frac{I_\phi}{1 - \left(\frac{U}{U_{проб}}\right)^m}. \quad (4.33)$$

Лавинний процес відбувається дуже швидко: інерційність лавинних фотодіодів характеризується часом перемикавання від 10^{-8} с до 10^{-9} с, множення коефіцієнта посилення фотоструму K_i на смугу частот досягає рекордних значень: $K_{ifzр} \approx 10^{11}$ Гц.

Гранично реалізоване значення K_i може бути тим більшим, чим менший тепловий зворотний струм фотодіода, тому при використанні кремнію і арсеніда галію досягнуто $K_i \approx 10^3 - 10^4$, а для германія його величина звичайно не більше 10^2 , при цьому у кремнієвих и арсенід-галієвих приборів нижче рівень шумів.

В режимі лавинного фотомноження успішно випробувані практично всі діодні структури : $p^+ - n$, $p - i - n$, $n - p - i - p^+$; діоди з бар'єром Шотткі.

Лавинні фотодіоди перспективні при виявленні слабких оптичних сигналів. В даній роботі застосовується лавинний фотодіод S9251-02, який згідно формулам (4.32) – (4.33) забезпечує селекцію сигнал-шум 100×10^{-12} Вт, що повністю задовольняє параметрам розрахованим в п.4.2.1 та 4.2.2.

5 МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИЙМАЛЬНОЇ ОПТИКИ

5.1 Моделювання розподілу випромінювання в фотоприймальному вузлі системи приймальної оптики

Моделювання проводилось за допомогою сучасного прикладного математично-графічного пакету Zemax. Дана програма є світовим лідером з виробництва оптичних елементів. Перший крок моделювання – це введення параметрів лінзи-склейки (коліматор приймальної частини лазерної системи), які занесені до таблиці 5.1 та зображені на рисунку 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри лінзи-склейки AC508-150-A

Діаметр, мм	f , мм	f_b , мм	R_1 , мм	R_2 , мм	R_3 , мм	t_c , мм	t_{c1} , мм	t_{c2} , мм	t_e , мм	Матеріал
50,8	150,0	140,4	83,2	-72,1	-247,7	15,0	12,0	3,0	9,7	N-BK7/SF5

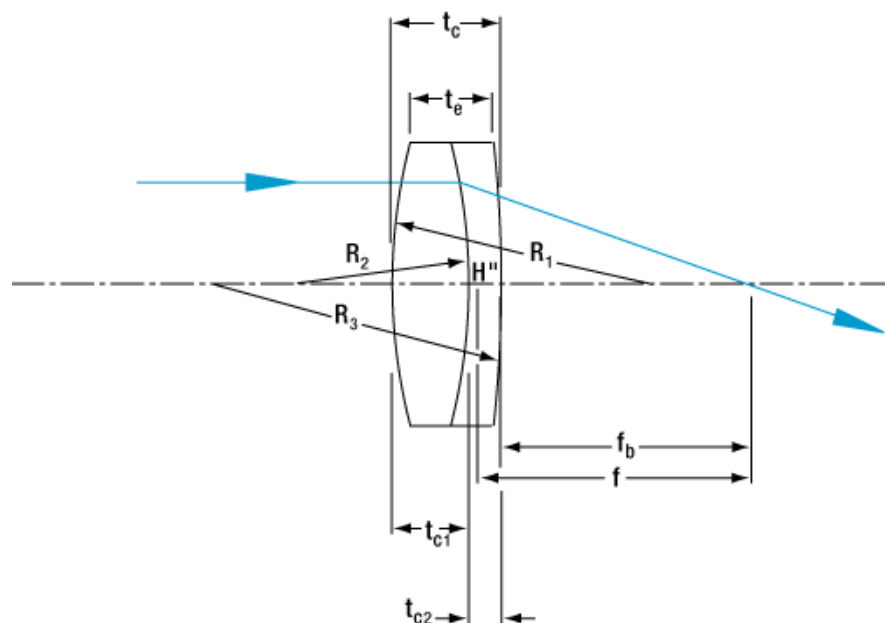


Рисунок 5.1 – Зображення параметрів лінзи-склейки AC508-150-A

В результаті моделювання параметрів з таблиці 5.1, та вікна параметрів пакету Zemax (рис. 5.2), було отримано віртуальну модель AC508-150-A (рис. 5.3.)

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE x 1E-6
0	OBJECT	Standard ▾	Infini...	Infinity			0.000	0.000	0.000	0.0...	0.000
1	STOP (aper)	Standard ▾	AC508-1...	83.180	12.000	N-BK7	THORA	25.400 U	0.000	25.400	0.0...
2	(aper)	Standard ▾	-72.1...	3.000	SF5		25.400 U	0.000	25.400	0.0...	
3	(aper)	Standard ▾	-247...	140.134		THORASLAH...	25.400 U	0.000	25.400	0.0...	0.000
4	IMAGE	Standard ▾	Infini...	-			0.020	0.000	0.020	0.0...	0.000

Рисунок 5.2 – Вікно параметрів AC508-150-A в пакеті Zemax

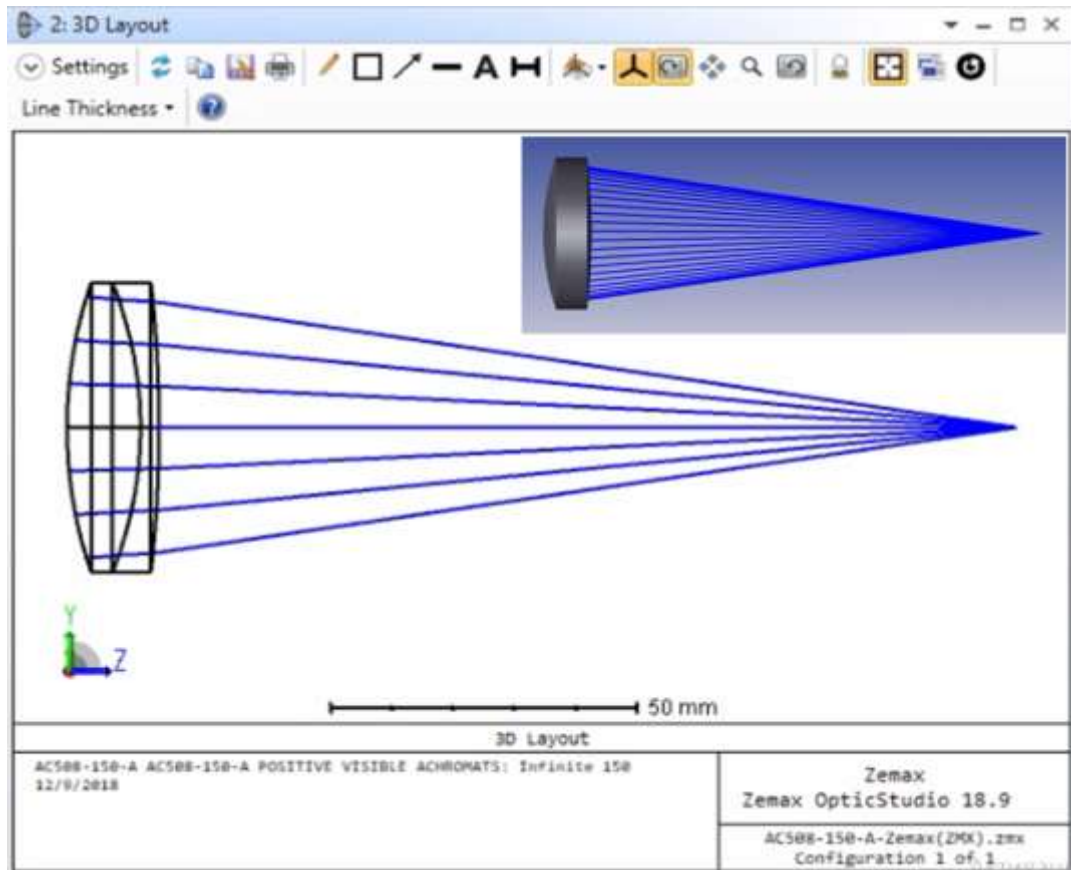


Рисунок 5.3 – Результат моделювання лінзи-склейки AC508-150-A

Далі було промодельовано систему лінза AC508-150-A-фотоприймач S9251-02 (рис. 5.4).

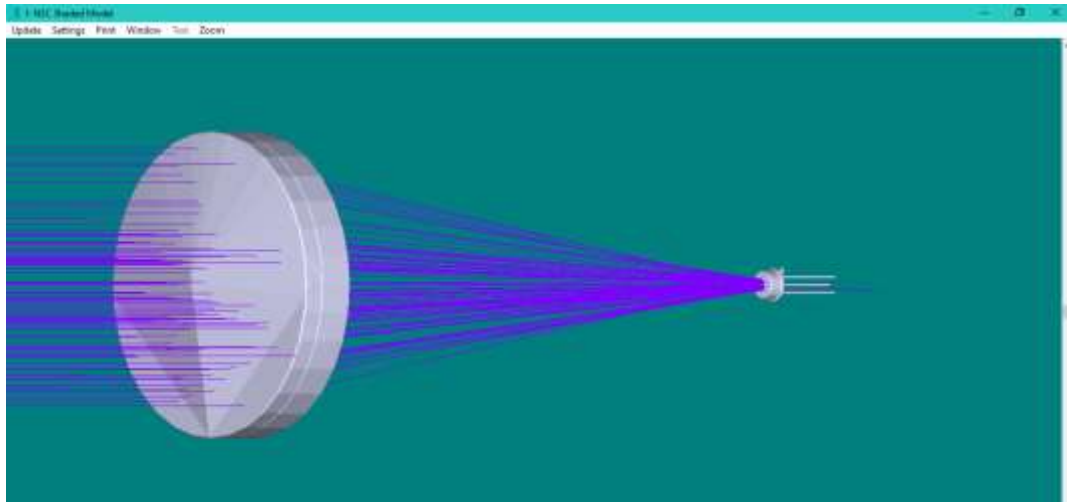


Рисунок 5.4 – Теоретична модель фотоприймального вузла системи приймальної
ОПТИКИ

В результаті було отримано розподілення поля на фотоприймачі, з якого можна зробити висновок, що структура відбитого випромінювання від об'єкта рівномірно розподілена і повністю попадає в габарити фоточутливої площі фотодіода (рис. 5.5). Тобто, це ще одне підтвердження правильного вибору компонентів фотоприймального вузла лазерної системи виявлення оптики.

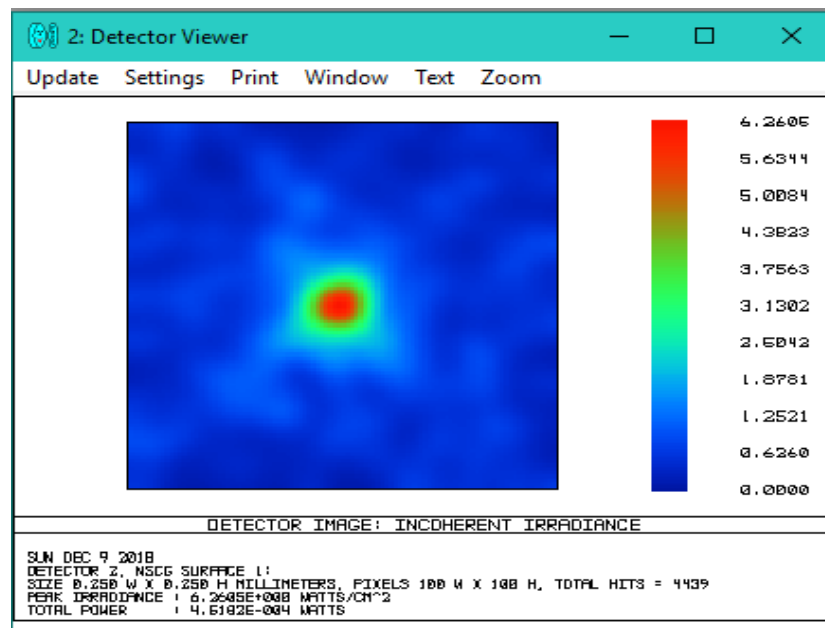


Рисунок 5.5 – Розподілення поля відбитого від об'єкта випромінювання
на активній області фотодіода

5.2 Визначення плями розсіювання для лінзи фотоприймального модуля

Більш детальним аналізом роботи оптики приймальної частини лазерної системи виявлення оптики є визначення плями розсіювання відбитого випромінювання, яке фокусується на активну область фотоприймача. Розраховуючи оптичну систему зображену на рисунку 5.4, можна зробити висновки, що діаметр плями розсіювання для довжини хвилі 800 нм складає 80 мкм, для довжини хвилі від 900 нм до 155 мкм (рис. 5.6).

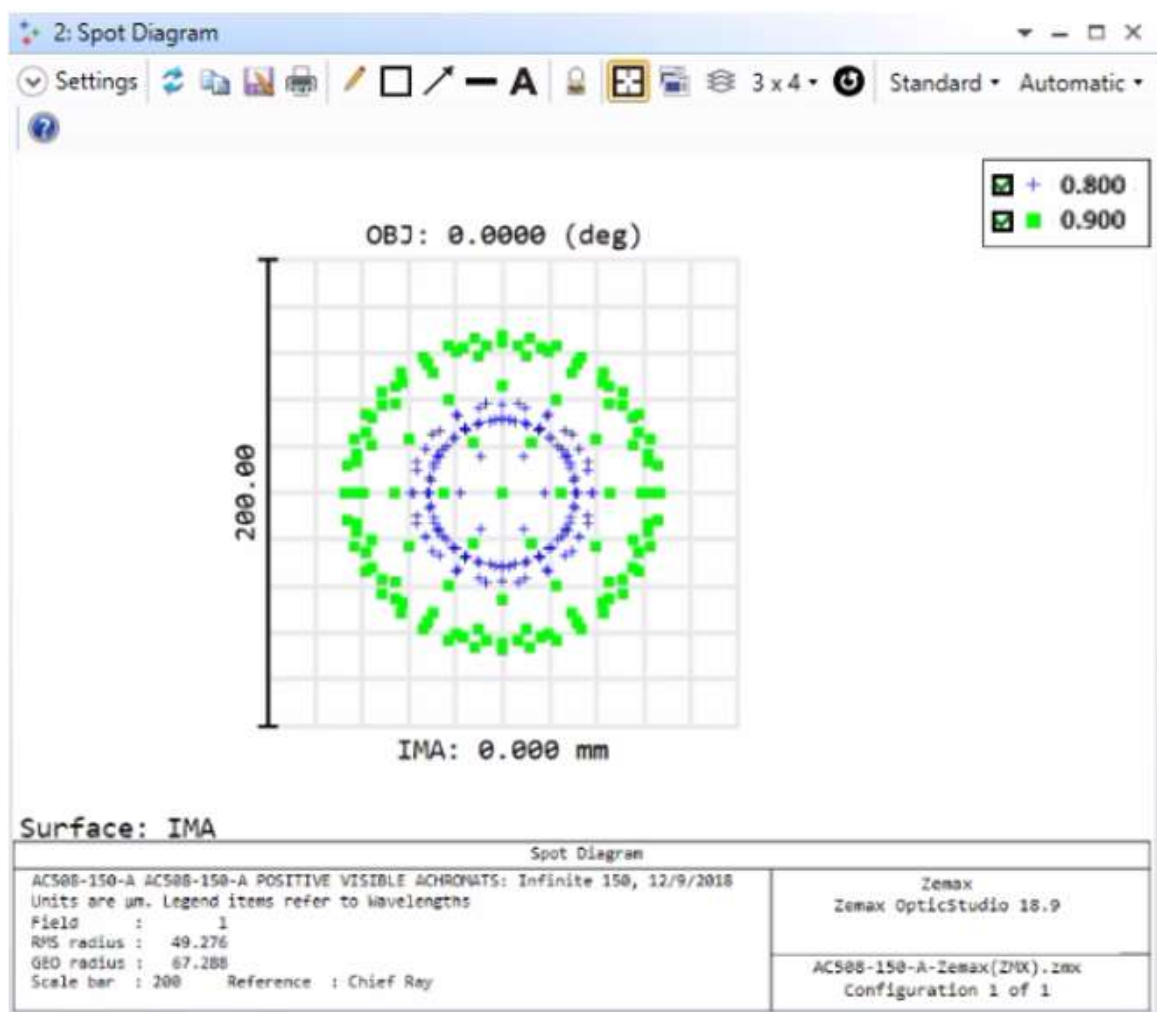


Рисунок 5.6 – Зображення плями розсіювання сфокусованого випромінювання з довжинами хвиль 800 нм та 900 нм на активній області фотоприймача

Але кожен оптичний елемент має матеріальну дисперсію та аберації, що призводить до дефокусування випромінювання (зміна фокусної відстані в проміжку від -100 мкм до 100 мкм). На рисунку 5.7 зображено плями розсіювання при дефокусуванні випромінювання, тобто зміни фокусної відстані в проміжку від -100 мкм до 100 мкм.

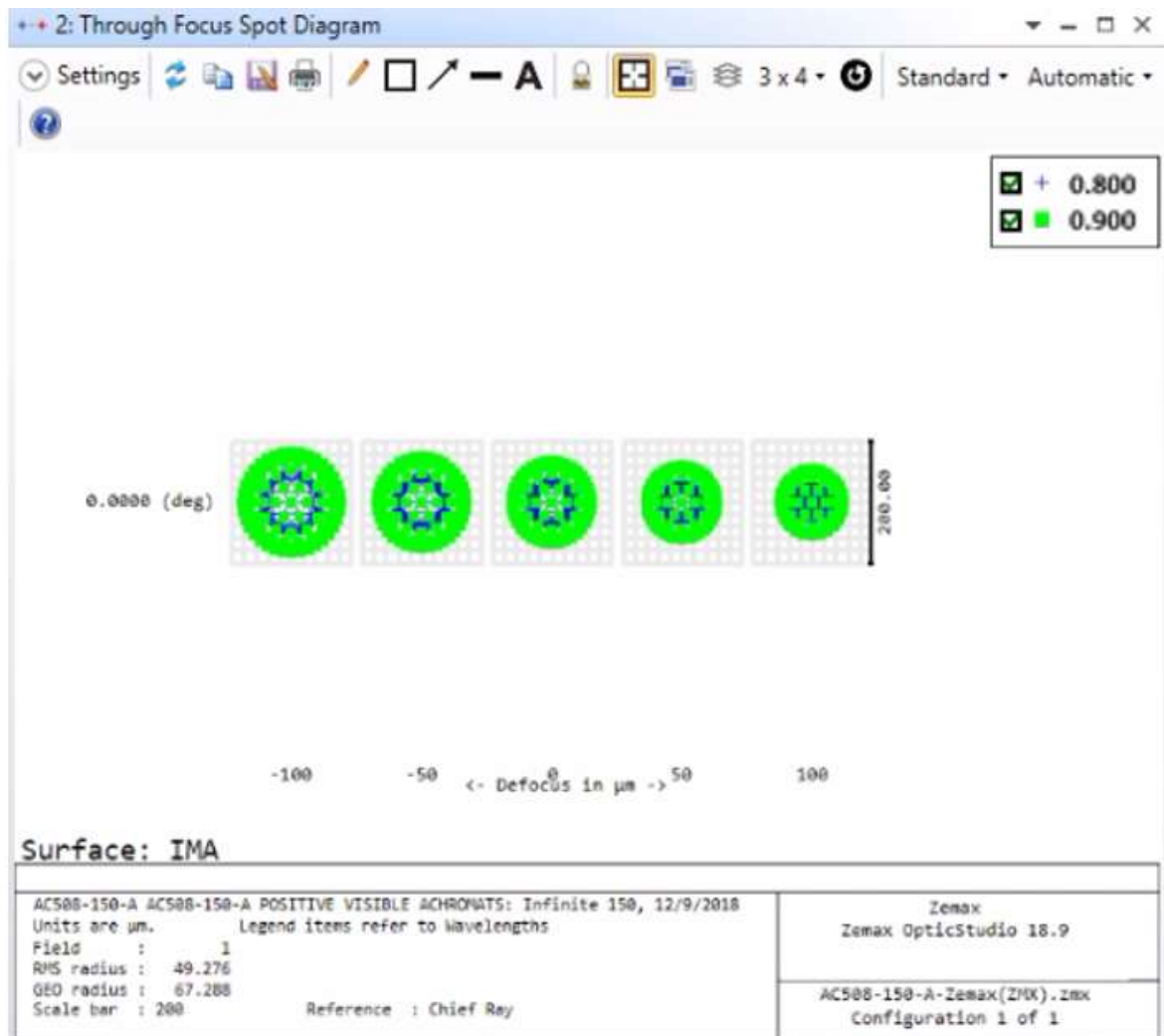


Рисунок 5.7 – Зображення плям випромінювання при дефокусуванні

З рисунку можна зробити висновки: при дефокусуванні випромінювання на $+ 50$ мкм пляма розсіювання зменшиться в діаметрі для довжини хвилі від 800 нм до 75 мкм, для довжини хвилі від 900 нм до 148 мкм; при дефокусуванні випромінювання на $+ 100$ мкм для довжини хвилі 800 нм діаметр плями розсіювання становитиме 60 мкм, для 900 нм – 138 мкм. При дефокусуванні на

-50 мкм діаметр плями розсіювання збільшиться для 800 нм до 90 мкм, для 900 нм до 185 мкм; при дефокусуванні на -100 мкм діаметр плями розсіювання зміниться для 800 нм на 140 мкм, для 900 нм – на 186 мкм. Тобто при проектуванні приймальної частини лазерної системи виявлення оптики дефокусування не значне, але його потрібно урахувати та внести корективи в конструкцію корпусу.

5.3 Дослідження та визначення основних параметрів та властивостей фотоприймального вузла оптики

На рисунку 5.8 зображено криві аберацій, які свідчать про їх наявність. Тобто аберації для вертикальної і горизонтальної складової поляризації випромінювання довжиною хвилі 800 нм та 900 нм складають ± 100 мкм або ± 10 хвиль (рис. 5.9).

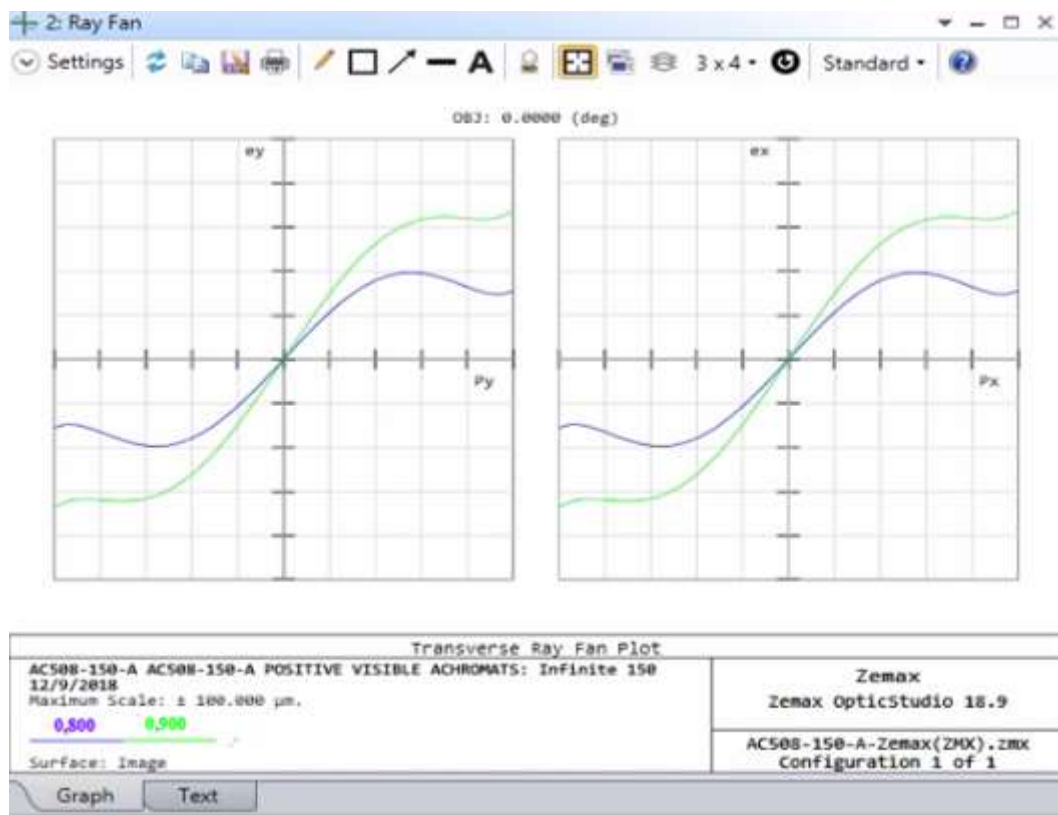


Рисунок 5.8 – Зображення кривих аберацій випромінювання для лінзи AC508-150-A

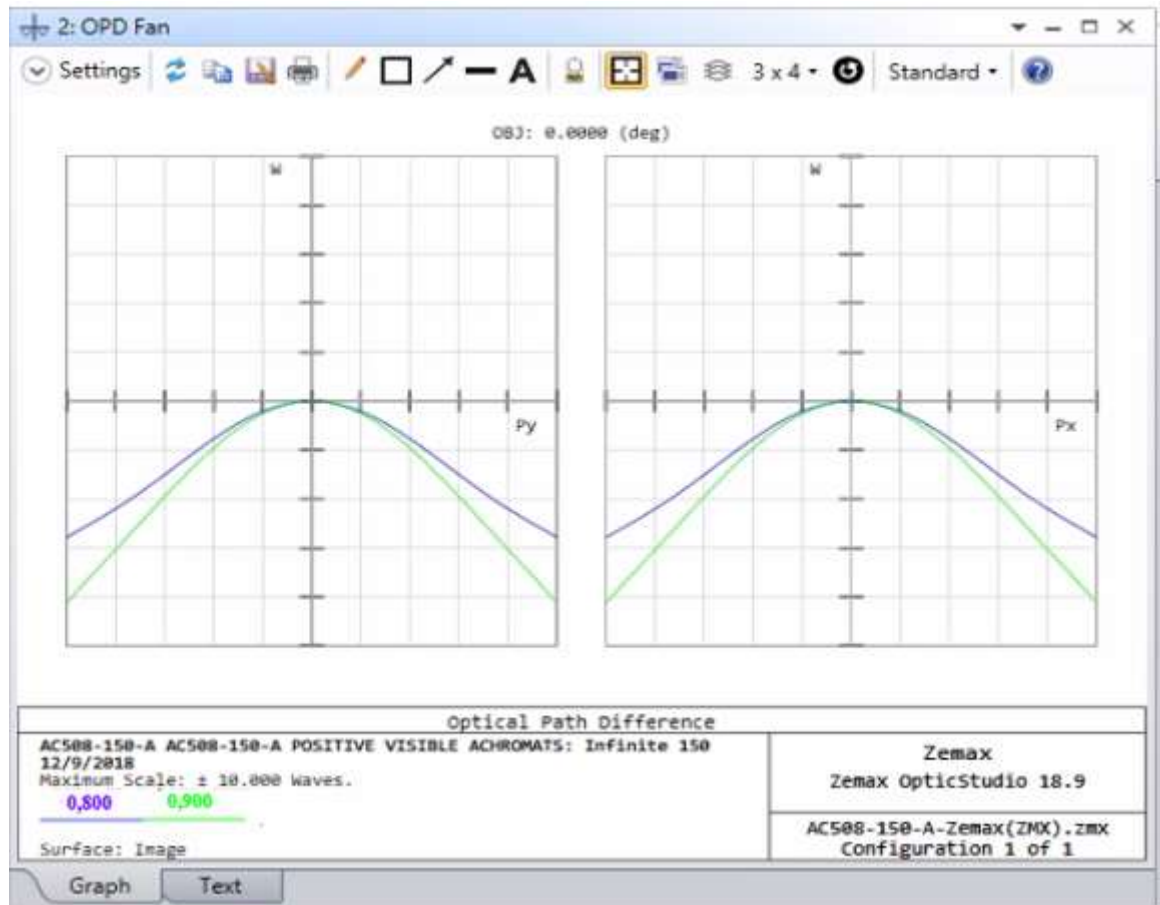


Рисунок 5.9 – Зображення кривих аберацій (кількість хвиль) випромінювання для лінзи AC508-150-A

На рисунку 5.10 зображено криву можливого дефокусування коліматора приймальної оптики .

З рисунку видно, що при найгірших характеристиках оптики фотоприймального вузла лазерної системи дефокусування може складати для довжини хвилі 800 нм – 180 мкм, для 900 нм – 250 мкм. Хоча данні і є теоретичними, але їх потрібно враховувати при виготовленні дослідного зразка лазерної системи виявлення оптики шляхом введення в конструкцію юстирувальних пристроїв з мікрометричним кроком.

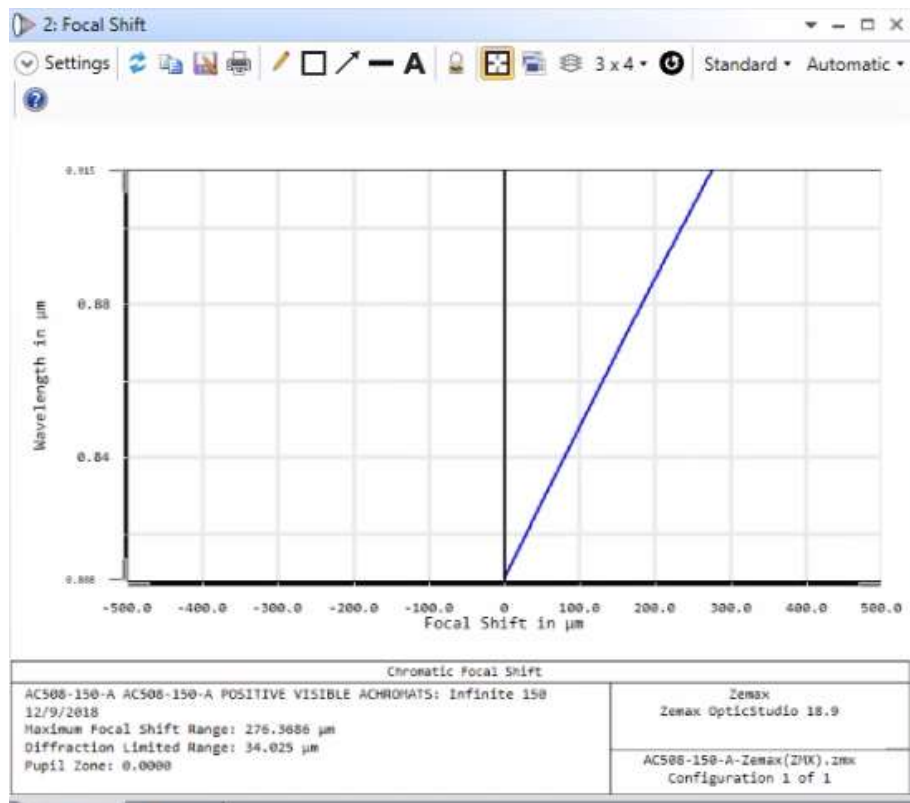


Рисунок 5.10 – Крива дефокусування випромінювання оптикою вузла фотоприймального пристрою

На рисунку 5.11 зображено результат розрахунків пропускної здатності оптичних елементів фотоприймального вузла лазерної системи

З результатів зображених на рисунку видно, що пропускання для вертикальної та горизонтальної складових поляризації однакові і складають для довжини хвилі 800 нм 90 %, для довжини хвилі 900 нм – 80 %. Виходячі з цих результатів можна побудувати карти контрасту втрат по поверхні коліimatorа (рис. 5.12).

На рисунку 5.12, а, при тангенціальному виді, найменші втрати будуть чітко на горизонтальній осі лінзи і збільшуються поступово до країв, при сагітальному виді розподіл втрат найменший на вертикальній осі лінзи і збільшується поступово до її країв. На рисунку 5.12, б, при тангенціальному виді, найменші втрати будуть чітко на горизонтальній осі та на краях лінзи вертикальної складової, при сагітальному виді розподіл втрат найменший на вертикальній осі та на краях лінзи горизонтальної складової.

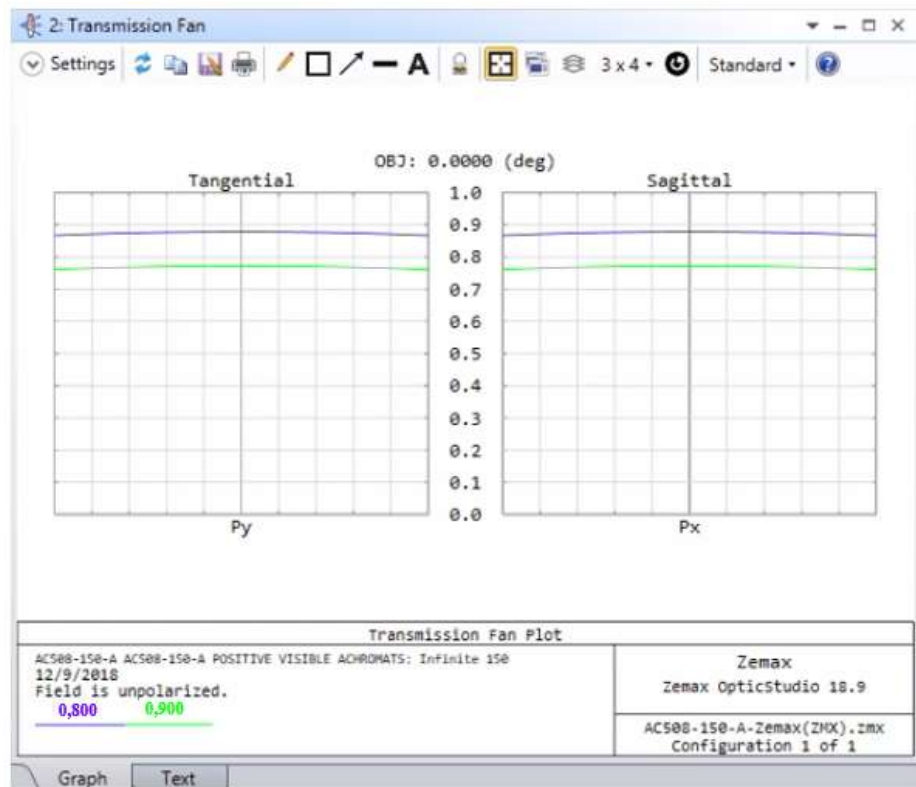
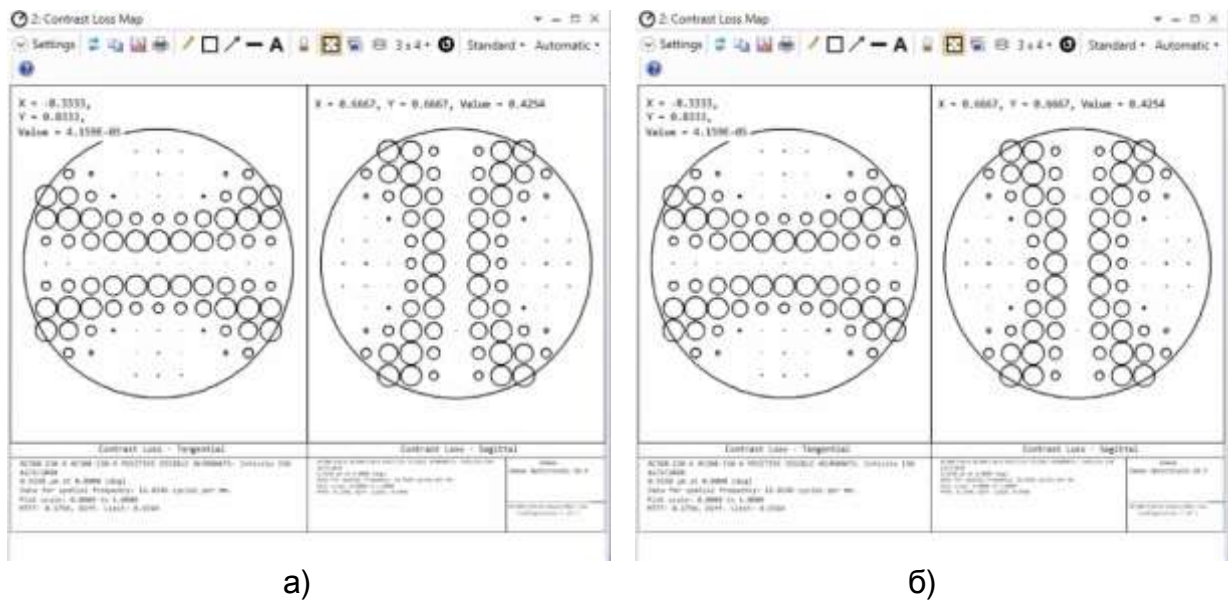


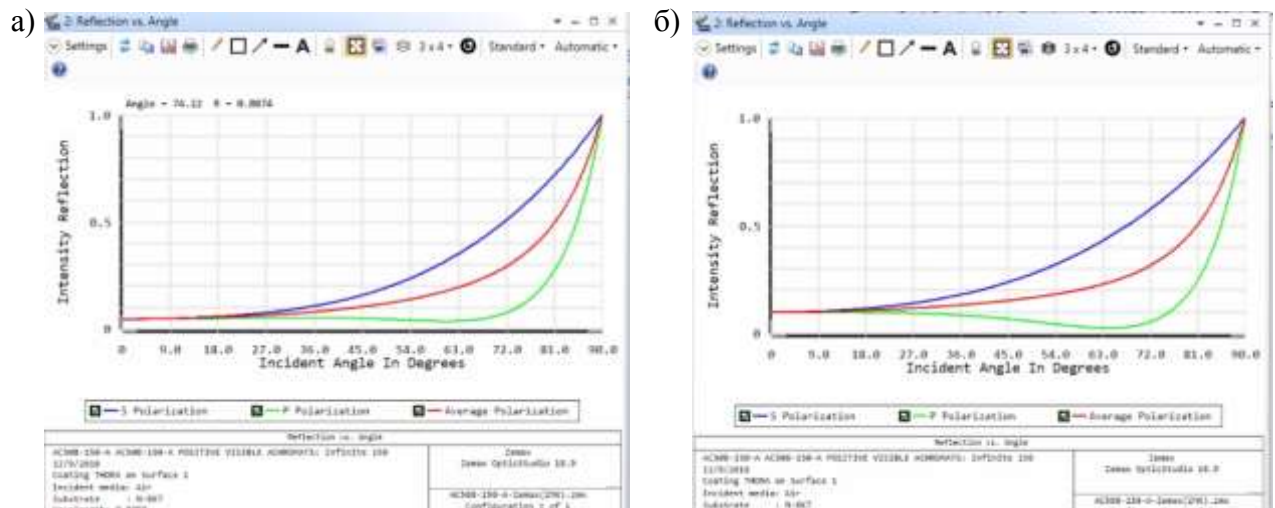
Рисунок 5.11 – Зображення пропускної здатності коліматора AC508-150-A



а) – довжина хвилі 800 нм; б) – довжина хвилі 900 нм.

Рисунок 5.12 – Корти контрасту втрат по поверхні коліматора AC508-150-A

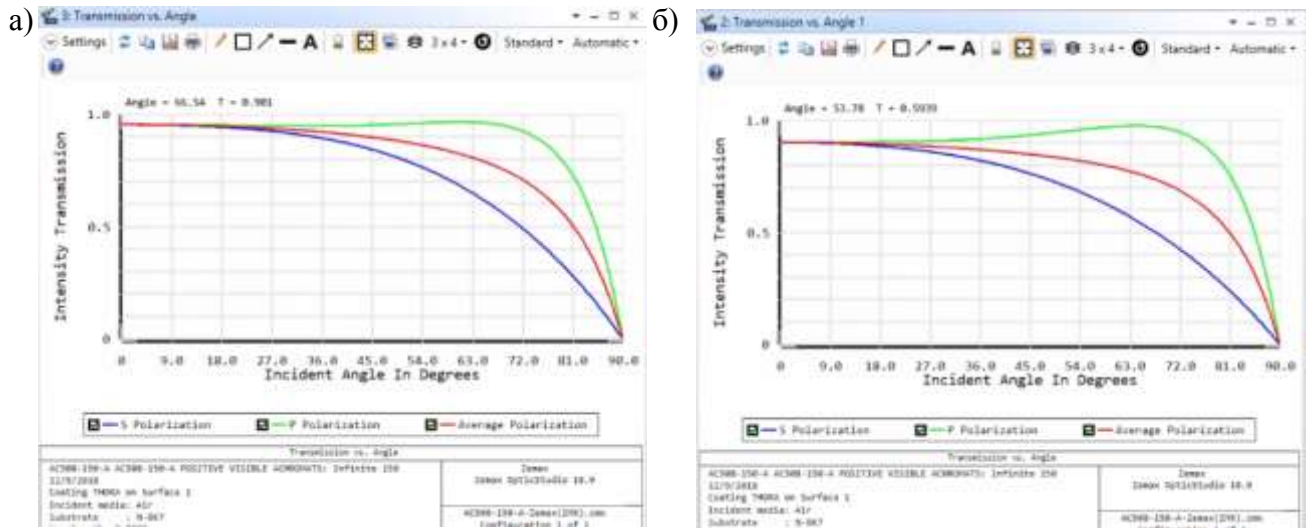
На рисунку 5.13 зображено залежності коефіцієнтів відбиття від поверхні коліматора AC508-150-A від кута падіння, тобто при падінні чітко перпендикулярно поверхні відбиття мінімальні, при інших кутах, відносно нормалі, відбиття збільшується, при падінні відносно 90° від нормалі відбиття 100 %.



а) – довжина хвилі 800 нм; б) – довжина хвилі 900 нм.

Рисунок 5.13 – Залежність коефіцієнту відбиття випромінювання від кута падіння на поверхню коліматора AC508-150-A

На рисунку 5.14 зображено залежності коефіцієнтів пропускання випромінювання коліматором AC508-150-A від кута падіння, тобто при падінні чітко перпендикулярно поверхні пропускання становить 100 %, при інших кутах відносно нормалі пропускання зменшується, при падінні відносно 90° від нормалі пропускання становить 0 %.



а) довжина хвилі 800 нм; б) довжина хвилі 900 нм.

Рисунок 5.14 – Залежність пропускну́ї здатності коліматора АС508-150-А від кута падіння випромінювання

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто системи розпізнавання оптичних пристроїв, метод їх проектування, проведено моделювання роботи лазерної системи реєстрації оптики за допомогою програми Zemax, а саме:

- розрахунок параметрів та характеристик фотоприймального вузла системи приймальної оптики;
- розрахунок характеристик випромінювання при лазерному зондуванні на різних дистанціях;
- розрахунок сигнал – шум на вході фотоприймача;
- моделювання розподілу випромінювання в фотоприймальному вузлі системи приймальної оптики;
- визначенню пляму розсіювання для лінзи фотоприймального модуля;
- дослідження та визначення основних параметрів та властивостей фотоприймального вузла системи приймальної оптики.

Моделювання показує, що розрахована система здатна розпізнавати оптичні об'єкти з високою точністю.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Crépy B., Orléans C. Multifunction Laser Source for Ground and Airborne Applications. 2011 // Proc. SPIE 8039.
2. Anonymous. PAPV for Optical and Electronic Countermeasures // Military Technology. 2004.
3. Brännlund C., Tidström J., Henriksson M. Combined hostile fire and optics detection // Electro-Optical and Infrared Systems: Technology. 2013.
4. LIU Bing-qi, ZHOU Bin, WU Dong-sheng, ZHANG Yu. Dual-channel active laser detection system // Optics and Precision Engineering. 2012. Vol. 20, No 2. P. 241–246.
5. He S., Meng Y. Gong M. Active laser detection system for recognizing surveillance devices // Optics Communications. 2018. Vol. 426. P. 313–324.
6. Chengmin Lei, Feng zhou, Tao Chen, He Chen, YaoYao Ma. Long-range active laser detection system based on cat's eye effect. // Proceedings of the SPIE. 2022. Vol. 12169, id. 121691O 6 p.
7. Kurskoy, Yuriy S., Oleksandr S. Hnatenko, Yuriy P. Machekhin, Mykhaylo V. Neofitnyi, Valeriy I. Zarytskyi, Waldemar Wójcik, Sandugash Orazalieva, and Saule Smailova. "Optical system recognition via topological methods." In Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020, vol. 11581, pp. 170-176. SPIE, 2020.
8. Li Li, Jianlin Renn, Xingbin Wang. Fast cat-eye effect target recognition based on saliency extraction // Optics Communications. 2015. Vol. 350. P. 33–39.
9. Itti L., Koch C., Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1998. Vol. 20. P. 1254–1259.
10. Hou X., Zhang L. Saliency detection: a spectral residual approach, Proc. CVPR. 2007: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
11. Jie Ma Shengxiang Qi, A. Chao Tao. Robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds // IEEE Geosci: Remote Sens. Lett. 2013. 10 (3). URL: <https://www-academia-edu.translate.goog/89263338/A> (дата звернення 19.11.2023).

12. Wang X., Lv G., Xu L. Infrared dim target detection based on visual attention // *Infrared Phys. Technol.* 2012. Vol. 55, No 6. P. 513–521.
13. Sifeng He, Yuan Meng, Mali Gong. Freeform lens design to eliminate retroreflection for optical systems // *Applied Optics.* 2018. Vol. 57, No 5. P. 1218–1224.
14. Hnatenko, O. S., Neofitnyi, M. V., Machekhin Yu, P., & Zarytskyi, V. I. (2019). Zhdanova Yu. 1, 55 mkm fiber laser with electronic controlled mode-locking. In *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers.*
15. MacHekhin, Y. P., Kurskoi, Y. S., & Gnatenko, A. S. (2018). Physical and mathematical foundations of measurements in nonlinear dynamic systems. *Telecommunications and Radio Engineering*, 77(18), 1631-1637.
16. Гнатенко О. С., Жданова Ю. В. Моделювання лазерних прецизійних інформаційно-вимірювальних пристроїв. 10-та Всеукраїнська науковопрактичної конференції молодих учених і студентів, 16-17 травня 2019 р. м. Одеса, 2019. Одеса. С. 213–214.
17. Gnatenko, A. S., & McHekhin, Y. P. (2015). Generation mode stability of a fiber ring laser. *Telecommunications and Radio Engineering*, 74(7), 641-647.
18. Afanasieva, I., Golian, N., Hnatenko, O., Daniil, Y., & Onyshchenko, K. (2019). Data exchange model in the internet of things concept. *Telecommunications and Radio Engineering*, 78(10). P. 869-878.
19. Gnatenko, A. S., Machekhin, Y. P., & Natarova, Y. V. (2015). The control system of the pump diodes fiber ring femtosecond lasers. *Applied Radio Electronics: Sci. Journ*, 14(2), 185-188.
20. Neofitnyi, M. V. Kurskoy Yu. S., Hnatenko O.S, Machekhin Yu. P., Topological model of laser emission parameters research. In *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL* 2019* (P. 6–8).
21. Obozna, V.P. Formation of Laser Radiation Pulses for Encoding inFormation / V.P. Obozna, O.S. Hnatenko // *Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції, м. Суми, 5-9 лютого 2018 р. / Відп. за вип. С.І. Проценко. Суми: СумДУ, 2018. С. 24.*

22. Gnatenko, A. S., K. A. Vasko, and K. D. Aleksieieva. "The study polarization control using the lc cells inside the resonator of a fiber femtosecond laser." (2015).
23. Gnatenko, A. S., & Machechin, Y. P. (2015). Vasko K.O Providing control of the polarization inside the resonator fiber ring laser. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. Київ, 20-23.
24. Hnatenko, O. S., and V. P. Obozna. "Calculation of the Stability of the Fiber Ring Laser with Liquid Crystal Polarization Controllers." (2018).
25. MacHekhin, Y. P., Kurskoi, Y. S., & Gnatenko, A. S. (2018). Physical and mathematical foundations of measurements in nonlinear dynamic systems. Telecommunications and Radio Engineering, 77(18), 1631-1637.
26. Guriev, I. V., Sukhoivanov, I. A., Gnatenko, A. S., & Lipkina, V. I. (2008). Multiple plane waves expansion method for dispersive media. Telecommunications and Radio Engineering, 67(9), 833-841.
27. Gnatenko, A. S., Machechin, Y. P., Kurskoy, Y. S., Obozna, V. P., & Vasianovych, A. V. (2018). Ring fiber lasers for telecommunication systems. Telecommunications and Radio Engineering, 77(6), 541-548.
28. Hnatenko, O. S. (2022). THEORETICAL ANALYSIS OF THE DISPERSION CHARACTERISTICS OF OPTICAL ELEMENTS USED IN DESIGNING FIBER LASERS. Telecommunications and Radio Engineering, 81(3).
29. Hnatenko O. S. Modeling the interaction of laser radiation with complex biological optical systems / O. S. Hnatenko, O. O. Kalna // Інформатика, математика, автоматика.
30. Obozna, V. P., and O. S. Hnatenko. "The impact of laser radiation on nanoparticles, which using in medical." (2019).
31. Hnatenko O. Quantum computing. Quantum information technologies as the basis for future learning platforms / O. Hnatenko // The 19 th INTERNATIONAL CONFERENCE INFORMATION TECHNOLOGIES AND MANAGEMENT 2021 April 22-23, 2021, ISMA University of Applied Science, Riga, Latvia. P. 87-89.