

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

« ____ » _____ 20 ____ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в
приладобудуванні» спеціальності 151
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Компактна комп'ютерно-інтегрована оптико-
електронна система наведення»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПО-01

Омельченко Владислав Віталійович

Керівник:

Професор,

Боровицький Володимир Миколайович

Рецензент:

Безлуга Наталя Василівна

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ДП ПО01.00.008.000	Відомість дипломного проєкту	1	
2	A4	ПО01.00.008.000 ЗП	Завдання на дипломний проєкт	3	
3	A4	ПО01.00008.000 ПЗ	Пояснювальна записка	65	
4	A1	ПО01.00.008.001 СК	Складальне креслення	1	
5	A2	ПО01.00.008.002 СС	Структурна схема ОЕС	1	
6	A2	ПО01.00.008.003 ФС	Функціональна схема МК	1	
7	A2	ПО01.00.008.004 ССП	Структурна схема програми МК	1	
8	A2	ПО01.00.008.005 БС	Блок-схема алгоритму роботи МК	1	
9	A3	Плакат	Ілюстрація застосування системи	1	
10	A3	Плакат	Оптична система і абераційні графіки	1	
11	A4	Виноски	Виноски до складального креслення	1	

				ДП ПО01 00.008.000		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Омельченко В.В.				1	1
Керівн.	Боровицький В.М.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІОНС Гр. ПО-01	
Консульт.						
Н/Контр.						
Зав.каф.						

Пояснювальна записка
до дипломного проекту
на тему: «Компактна комп'ютерно-інтегрована
оптико-електронна система наведення»

Київ – 2024 року.

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

Приладобудівний факультет
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних
систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Надія БУРАУ

«__»_____2024_р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу

студента

Омельченко Владислава

Віталійовича

- Тема проекту «Компактна комп'ютерно-інтегрована оптико-електронна система наведення», затверджена наказом по університету від «__»____ 2024 р. №_____
- Термін подання студентом дипломної роботи: 15.06.2024 р.
- Вихідні дані до проекту:
 - Тип – активна оптико-електронна система наведення з лазерною підсвіткою об'єкту.

					ПО01.00.008.000 ЗП						
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата	Компактна конструкція системи наведення за лазерною підсвіткою			Літ.	Лист	Листів	
Розроб.		Омельченко В.В.									
Перевір.		Боровицький В.М.								1	1
								ПБФ, КІОНС			
Н. Контр.											
Затверд.											

- 3.2. Кутове поле зору – не менше +/- 30 кутових градусів.
- 3.3. Максимальна робоча відстань – не менше 30 м.
- 3.4. Кількість каналів – від 7 до 32.
- 3.5. Спектральний діапазон роботи – від 0.8 до 1.0 мкм.
- 3.6. Габарити – діаметр не більше 80 мм, довжина не більше 80 мм.

4. Зміст пояснювальної записки:

Вступ.

Розділ 1.Огляд сучасних оптико-електронних систем наведення.

Розділ 2. Математична модель оптико-електронного тракту комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.

Розділ 3. Розрахунок параметрів та характеристик комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.

Розділ 4. Конструкція комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.

5. Перелік графічного матеріалу, включеного до презентації:

5.1. Функціональна схема комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.

5.2. Оптична схема комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.

5.3. Електрона схема комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.

5.4. Блок – схема алгоритму роботи комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.

5.5. Структурна схема програми мікроконтролера комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.

5.6. Складальне креслення комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.

5.7. Креслення деталей комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.

Дата видачі завдання: 16.04.2024 р.

					П001.00008.000 ЗП	Лист.
						4
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Розділ 1. Огляд сучасних оптико-електронних систем наведення.	24.05.2024	
2	Розділ 2. Математична модель оптико-електронного тракту комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.	31.05.2024	
3	Розділ 3. Розрахунок параметрів та характеристик комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення.	05.06.2024	
4	Розділ 4. Конструкція комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи наведення	10.06.2024	
5	Графічна частина	12.06.2024	
6	Презентація	12.06.2024	
7	Попередній захист	07.06.2024	

Студент

Владислав Омельченко

Керівник

Володимир Боровицький

					П001.00008.000 ЗП	Лист.
						5
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Анотація

Дипломний бакалаврський проект має за мету розробку та реалізацію компактної оптико-електронної системи лазерного наведення з комп'ютерною інтеграцією. Ця робота спрямована на вдосконалення сучасних засобів наведення шляхом створення високоефективної системи, яка забезпечує точність та стабільність процесу наведення.

Основна увага приділяється забезпеченню компактності та ергономічності системи, що дозволяє її ефективно використовувати в різних умовах та приладах. Використання сучасних технологій у поєднанні з оптично-електронними компонентами дозволяє досягти високої точності та швидкодії системи наведення, в той же час забезпечуючи ергономічність використання та компактність конструкції механізму.

У проекті наданий детальний принцип роботи системи та загальна інформація про побудову.

Загальний обсяг роботи: 67 сторінок пояснювальної записки, 22 рисунків, 31 бібліографічних найменувань.

Ключові слова: наведення, лазер, ергономічність, компактність.

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Annotation

The bachelor's thesis project aims to develop and implement a compact electro-optical laser targeting system with computer integration. This work is aimed at improving the current targeting tools by creating a highly efficient system that ensures the accuracy and stability of the targeting process.

The main attention is paid to ensuring the compactness and ergonomics of the system, which allows its effective use in various conditions and devices. The use of modern technologies in combination with optical and electronic components allows to achieve high accuracy and speed of the targeting system, while ensuring ergonomic use and compact design of the mechanism.

The project provides a detailed principle of the system's operation and general information about the construction.

Total amount of work: 67 pages of explanatory note, 22 figures, 31 bibliographic references.

Keywords: targeting, laser, ergonomics, compactness.

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						7
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОНИХ СИСТЕМ НАВЕДЕННЯ	12
1.1. Принцип роботи та технічні характеристики ОЕС ІЧ наведення.	12
1.1.1. Основні поняття та визначення.....	12
1.1.2. ІЧ самонаведення і технічні характеристики систем у яких застосовується.....	14
1.1.3. Принцип роботи системи з використанням ІЧ наведення	18
1.2. Принцип роботи та технічні характеристики ОЕС лазерного наведення.	20
1.2.1. Лазери, принципи їх роботи і застосування у системах GN&C	20
1.2.2. Керування променем прямої видимості та принцип застосування у військових системах..	22
1.2.3. Принцип роботи систем із використанням лазерного наведення	25
Висновки до Розділу 1.	27
РОЗДІЛ 2. ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ТРАКТ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ	28
2.1. Тракт приймального каналу.	28
2.1.1. Функціонал приймального каналу і поверхнева будова	28
2.1.2. Фотодіоди, їх різновиди, особливості будови та режими роботи.	28
2.2. Теорія сигналів та шумів і підсилення сигналів на фотодіодах.	33
2.2.1. Сигнали, шуми, їх відмінності та вплив на роботу різноманітних приймальних трактів та аналізаторів.	33
2.2.2. ІЧ приймачі, сенсори та дистанційне керування.	37
2.2.3. Підсилення сигналу на фотодіоді за допомогою операційного підсилювача.	41
Висновки до Розділу 2.	42
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ.....	43
3.1. Загальні габаритні розрахунки.	43
3.1.1. Встановлення деталей та компонентів, які необхідно включити у габаритні розрахунки.....	43
3.1.2. Фактичні габаритні розрахунки.	45
3.2. Загальні енергетичні розрахунки.....	52
3.2.1. Потужність лазера.	52
3.2.2. Загальне живлення системи.....	53
3.3.3. Потік-сигнал, який потрапляє у ОС.	55
Висновки до Розділу 3.	58
РОЗДІЛ 4. КОНСТРУКЦІЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ.	59
Висновки до Розділу 4.	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:	67

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ОЕС – оптико-електронна система.

ОС – оптична система.

ІЧ – інфрачервоне.

АПП – автоматичний прицільний пристрій.

GN&C – guidance, navigation and control (укр. Наведення, навігація, керування)

ПТРК – протитанковий ракетний комплекс.

ATGM – anti-tank guided missile (укр. ПТКР, Протитанкова керована ракета).

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						9
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У світі зростає значення і важливість оптико-електронних систем наведення, які використовуються в різноманітних областях, таких як військова, аерокосмічна промисловість, медична т.ін.. Для нашої країни, очевидно, головним напрямом наразі є саме військовий. Швидкий розвиток технологій оптичного напрямку вимагає постійного удосконалення і зменшення розмірів таких систем, зберігаючи при цьому їхню ефективність та точність.

Тому ця дипломна робота присвячена розробці та впровадженню компактної комп'ютерно інтегрованої ОЕС наведення. ОЕС наведення використовуються для точного визначення та слідування за цільовим об'єктом і їхнє ефективне функціонування має велике значення для найбільш корисного утилізування тих чи інших приладів, озброєння або загальних систем. Однак, існуючі системи часто мають значний розмір та комплексність конструкторської, що ускладнює їх використання в умовах обмеженого простору або на мобільних платформах.

Метою даної роботи є розробка компактної системи наведення, яка поєднує в собі передові оптичні та електронні технології з комп'ютерною інтеграцією. Така система має на меті забезпечити високу точність та стабільність наведення цільових об'єктів, зберігаючи при цьому мінімальні розміри та вагу. Використання комп'ютерної інтеграції дозволяє підвищити рівень автоматизації та зручність управління системою, а також забезпечити можливість інтеграції з різноманітними комп'ютерними системами та інтерфейсами.

Дана робота розглядає аналіз сучасних методів та технологій, необхідних для створення компактної оптико-електронної системи наведення, а також описує процес розробки та реалізації прототипу такої системи. Також буде обговорена конструкція та найближчі до ідеалу складові і компоненти, з метою оцінки теоретичної ефективності та точності розробленої системи порівняно з існуючими аналогами.

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						10
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОНИХ СИСТЕМ НАВЕДЕННЯ

1.1. Принцип роботи та технічні характеристики ОЕС ІЧ наведення.

1.1.1. Основні поняття та визначення.

Electro-Optics (укр. Оптоелектроніка) – це напрям електротехніки, часто розрізняваний на фізичну та технічну складові. Він включає у себе компоненти електроніки, котрі працюють завдяки поширенню та взаємодії світла з різними спеціальними матеріалами.

Оптоелектроніка тісно пов'язана із фотонікою, що передбачає застосування генерації фотонів і це стосується не лише електрооптичного ефекту, а й взаємодії із електромагнітними та електричними складовими реакцій та процесів у матеріалах.[1] Заглиблюючись у Оптоелектроніку, необхідно також обговорити поняття Electro-optic effect (укр. Електрооптичний ефект), адже він є базисом, на якому працюють всі ОЕС:

Електрооптичний ефект – це зміна оптичних властивостей деякого активного матеріалу у відповідь на зміни у електромагнітному полі. Найбільш простим та розповсюдженим прикладом електрооптичного ефекту є зміна «Birefringence» (укр. Двопроменезаломлення).

Явище двопроменезаломлення розглядається у двох різних випадках:

- У комірці Керра
- У комірці Покеельса

Ефект Керра, також відомий як квадратичний електрооптичний ефект, полягає у зміні показника заломлення матеріалу під впливом електричного поля. У комірці Керра двопроменезаломлення змінюється пропорційно квадрату електричного поля, а симульованим матеріалом в більшості випадків є рідина.[2]

В оптиці ефект Покеельса, або електрооптичний ефект Покеельса, являє собою зміну показника заломлення оптичного середовища під впливом електричного поля, залежну від його напрямку. У комірці Покеельса двопроменезаломлення змінюється у лінійному відношенні до електричного поля, а симульований матеріал зазвичай є

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						11
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

кристалом.[3]

Некристалічні, тверді електрооптичні матеріали привертають увагу завдяки низькій вартості їх виробництва. Ці органічні матеріали, створені на основі полімерів, також називають органічними ЕО-матеріалами, пластиковими ЕО-матеріалами або полімерними ЕО-матеріалами. Вони складаються з нелінійних оптичних хромофорів, вбудованих у полімерну матрицю.[1]

Розібравшись і базовими з оптичними ефектами та напрямками, котрі вивчають основи галузей наведення навігації т.ін., можна повноцінно говорити про найголовніший розділ інженерії, котрий лежить у корінні розробки систем аналогічних темі проекту:

Guidance, navigation, and control (GN&C, укр. Наведення, навігація та керування) – розділ інженерії котрий займається розробкою систем керування рухом різних транспортних засобів та літальних апаратів. Хоча в багатьох випадках ці функції може виконувати людина з відповідним навчанням, проте через фізичні обмеження людського організму і ліміти обробки інформації мозком, необхідно використовувати автоматизовані системи керування. Тому для цього контролю широко використовуються цифрові системи. Навіть у випадках, коли людина здатна виконувати ці функції, системи GN&C часто надають переваги, такі як зменшення навантаження на оператора, згладжування турбулентності, економія палива тощо. Крім цього, просунуті програми GN&C дозволяють автоматичне, напівавтоматичне або дистанційне керування.

Складовою системи GN&C яка є об'єктом інтересу для цього проекту є «наведення», що доволі очевидно. Система наведення отримує дані від навігаційної системи та використовує їх для визначення маршруту до «пункту призначення». Цілями для системи наведення є вектори стану (положення та швидкість), які можуть бути сталі або змінні. Під час польоту система наведення безперервно обчислює курс руху для керування об'єктом. Наприклад, балістична ракета також налаштовується на відповідний вектор. Ці вектори створюються для досягнення деякої мети та можуть бути попередньо заплановані або створені динамічно відповідно до прямопропорційних швидкості та положення.

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						12
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вихідні дані, які отримує навігаційна система, використовуються як вхідні дані для системи наведення. Ці дані включають умови навколишнього середовища, такі як вітер, вода, температура тощо, а також характеристики транспортного засобу, наприклад, його масу та доступність системи управління. Система наведення обчислює інструкції для системи керування, яка включає виконавчі механізми об'єкта. Ці механізми здатні керувати траєкторією польоту та орієнтацією об'єкта без постійного контролю з боку людини, інакше кажучи вони бувають автоматизованими або повністю автоматичними у рамках обмеженого набору процесів.

Система наведення складається з трьох основних компонентів: блоку вхідних даних, блоку обробки та блоку вихідних даних:

- Блок вхідних даних включає в себе інформацію від датчиків, дані про курс, зв'язок тощо.
- Блок обробки містить один або декілька процесорів, інтегрує ці дані та визначає необхідні дії для підтримання або досягнення правильного курсу.
- Блок вихідних даних може прямо впливати на курс системи. Виходи можуть контролювати швидкість, співпрацюючи з такими пристроями, як турбіни, паливні насоси або реактивні двигуни, або ж безпосередньо змінювати курс, використовуючи елерони, рулі та інші пристрої.

1.1.2. ІЧ самонаведення і технічні характеристики систем у яких застосовується

Інфрачервоне випромінювання (ІЧ) – це електромагнітне випромінювання, яке займає спектральну область між червоним кінцем видимого світла (з довжиною хвилі приблизно 0,74 мкм і частотою 430 ТГц) та мікрохвильовим радіовипромінюванням (довжина хвилі приблизно 1-2 мм, при частоті 300 ГГц).[7]

Інфрачервоне випромінювання випромінюють усі тіла з температурою вище абсолютного нуля. Приблизно 50% загальної інтенсивності випромінювання Сонця над поверхнею моря в сонячний день припадає на інфрачервоний діапазон.[8] Випромінювання деяких оптичних квантових генераторів, таких як лазери, також знаходиться в інфрачервоній області спектру.

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						13
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

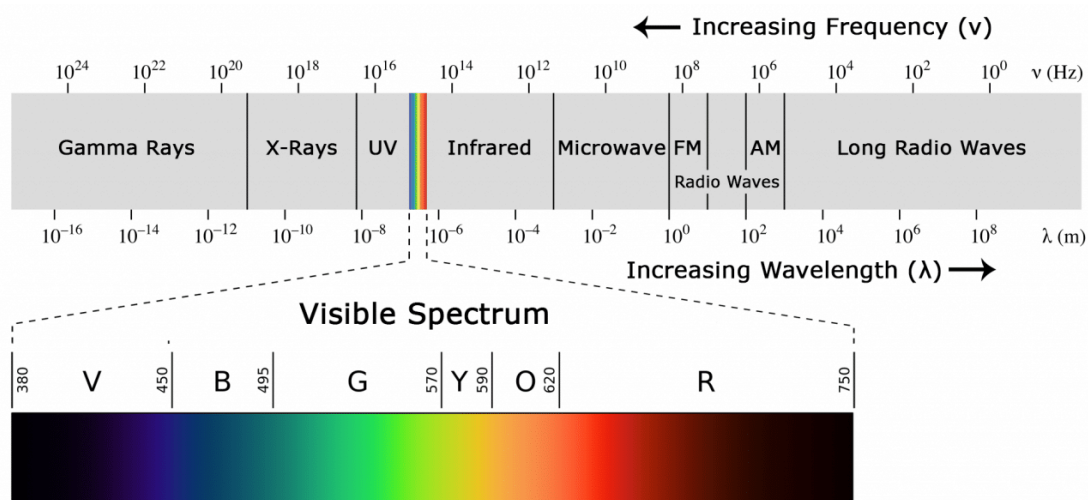


Рис. 1.1. Спектри світла за довжиною хвиль [22]

Для кращого пояснення та інтеграції підрозділу у тему проекту, ІЧ наведення найкраще буде пояснити на прикладі Теплової головки самонаведення, також відомої як Heatseeker (укр. Інфрачервона головка самонаведення).

Теплова головка самонаведення – це головка самонаведення, котра належить до класу пасивних систем наведення і працює за принципом перехоплення інфрачервоного випромінювання, яке створює захоплена ціль.

Теплові головки є пристроями, що працюють за оптоелектронним принципом і, фактично, їх робота полягає у ідентифікації цілі і видачі у АПП захопленого сигналу і для вимірювання кутової швидкості лінії візування та передачі цього сигналу автопілоту пристрою, у який теплова головка інтегрована.

Як не складно здогадатися, об'єктом інтересу в плані носіїв для проекту є ракети. І ракети, які використовують інфрачервоне випромінювання для пошуку цілі часто називають «тепловими», оскільки значення частоти хвилі інфрачервоного випромінювання нижче видимого спектра світла і випромінюється гарячими тілами. Багато об'єктів, наприклад люди, двигуни літаків і автомобілів генерують і утримують тепло, і завдяки цьому, особливо помітні в інфрачервоному діапазоні довжини світлових хвиль в порівнянні з об'єктами фонового середовища.

ІЧ головки самонаведення більш ранніх прототипів найкраще виявляли інфрачервоне випромінювання з короткими довжинами хвиль, наприклад, 4.2 мікрон, характерні для викидів двоокису вуглецю реактивних двигунів. Такі головки, чутливі до діапазону хвиль від 3 до 5 мікрон, називають "одноколірними" або

однодіапазонними. Сучасні інфрачервоні головки часто працюють у діапазоні від 8 до 13 мікрон, які поглинаються атмосферою найменше, і відомі як "двоколірні" або дводіапазонні системи. Ракети з такими головками важче знищити за допомогою інфрачервоних протидій, як-от фальшивих теплових цілей.

В той же час, сучасніші ракети з ІЧ голівкою самонаведення, такі як «ASRAAM», оснащені ІЧ матрицею, яка дозволяє створювати інфрачервоне зображення цілі, подібно до тепловізора.[4] Це дає змогу ракеті відрізнати літальний апарат від точкових джерел випромінювання теплових пасток. Такі ракети називаються тепловізійними і мають ряд переваг, головною з яких є широкий кут огляду, що дозволяє пілоту не направляти свій літак безпосередньо на ціль для запуску ракети.

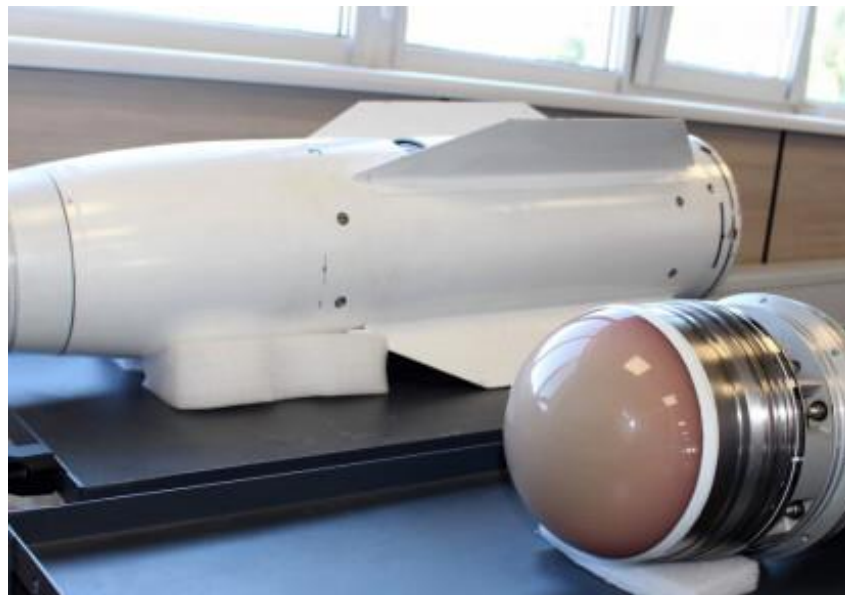


Рис. 1.2. Зовнішній вигляд головки самонаведення, розробленої компанією «Радіонікс»

Методи, які ракети використовують для розпізнавання та атаки цілей, відрізняються у залежності від способу сканування простору перед собою. Перші ракети використовували модульовальні диски або растри, які містили прозору пластину з чередуванням прозорих і непрозорих сегментів. Ці диски починали з простих шпичеподібних візерунків, а потім переходили до складніших методів виділення прозорих сегментів для покращення точності та роздільної здатності. Вони

також служили для фільтрації інфрачервоного випромінювання навколишнього середовища та захисту від інфрачервоних пристроїв протидії. Мета цих дисків полягала в створенні модуляції зображення для визначення відстані до цілі, що використовувалося для корекції траєкторії ракети.[5]

Під час початку польоту ракети, не завжди необхідно точно спрямовувати її на ціль. Багато теплових ракет використовують механізм карданного підвісу для того, щоб закріпити шукач (камеру), що дозволяє датчику залишатися спрямованим на мішень, навіть у випадку, коли ракета рухається в іншому напрямку. Людина-пілот або оператор вказує координати мішені шукачу за допомогою радару, системи нашоломної цілевказівки, оптичного прицілу або просто спрямовуючи ніс літака чи пускової установки безпосередньо на ціль. Після виявлення та розпізнавання цілі шукачем ракети, він надсилає сигнал оператору для підтвердження захоплення цілі (що дозволяє ракеті слідувати за нею). Після того, як ракета розпочинає слідування за ціллю, вона працює автономно, незалежно від руху літака чи пускової установки. Після старту ракета не може контролювати напрямок руху, поки не запустить двигун і не досягне достатньої швидкості, щоб її крила могли коригувати траєкторію. До цього моменту камера на карданному підвісі повинна самостійно відслідковувати ціль.

Сучасні тепловізійні матриці та технології створення мікроболометричних датчиків дають змогу розробляти інфрачервоні детектори для ракет, які не потребують спеціального охолодження. Це значно здешевлює виробництво ракет з тепловими головками самонаведення. Наприклад, ця технологія була застосована для модернізації ракети комплексу «FGM-148 Javelin». Використання нової головки самонаведення з комерційним неохолоджуваним інфрачервоним приладом дозволило знизити вартість на 40% порівняно з охолоджуваними інфрачервоними технологіями.[6]

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						16
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.1.3. Принцип роботи системи з використанням ІЧ наведення

Пояснити принцип роботи з інтегрованою системою наведення по ІЧ спектру найкраще буде зробити на прикладі вищезгаданого «FGM-148 Javelin». Вдаючись у деталі, Javelin (англ. Дротик), у подальшому «Джавелін», є переносним протитанковим ракетним комплексом (ПТРК), не плутайте із ПЗРК версією. Тим не менш, спектр його застосування шириться на набагато більшу кількість потенційних цілей аніж типові танкові, таких як:

- Земельні укріплення
- Бронетехніка
- Літальні апарати (Гелікоптери, БПЛА)

Джавелін працює за доволі відомим принципом «Вистрілив-забув» і це стає можливим саме завдяки інтегрованій у конструкцію ракет (набоїв) теплових голівок самонаведення, котрі як раз і експлуатують принцип теплового наведення, що було пояснено вище. Оператор ракетного комплексу не повинен супроводжувати або коригувати політ ракети після запуску, оскільки вона самостійно прямує до цілі. Оператор може обрати один із двох режимів атаки: удар згори, який призначений для ураження бронетехніки в її менш захищений верх, де зазвичай знаходиться люк у бронетехніки, або прямий удар.



Рис. 1.3. Фото-ілюстрація комплексу Джавелін

Система захоплення цілі ракети складається з трьох основних частин: матриці, чутливої до теплового випромінювання (англ. FPA, аббревіатура від focal plane array),

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		17

системи охолодження і калібрування, а також системи стабілізації.

Процес охолодження головки самонаведення базується на ефекті Джоуля — Томсона та здійснюється за допомогою вбудованого малогабаритного охолоджувача класу IDCA Dewar cooler.[9] Поки ракета знаходиться в транспортно-пусковому контейнері, її головка самонаведення охолоджується за рахунок стисненого аргону з ємності зовнішнього джерела живлення. Після пуску використовується балон всередині ракети.

Система Джавеліну використовує алгоритм, який базується на кореляційному аналізі постійно оновлюваного шаблону цілі. Цей алгоритм включає наступні етапи:[12]

1. Для отримання шаблону цілі як еталонної фотографії використовується командно-пусковий пристрій. Для цього перед запуском ціль фотографується зі збільшенням та обрізається кадр.
2. Кадри знімаються з ГСН ПТКР (головки самонаведення протитанкової керованої ракети) на матрицю розміром 64х64 пікселі зі швидкістю 180 кадрів на секунду.
3. На отриманому кадрі відбувається пошук ділянок із крупними об'єктами в ІЧ діапазоні, що обрізаються як «регіони інтересу»
4. За даними гіроскопів алгоритм оцінює приблизну відстань до цілі та горизонт ракети і, зазвичай, із допомогою перетворення Меліна[10] отримує зменшений і правильно обернений шаблон у такому ж масштабі, як і отримані знімки «регіонів інтересу».
5. Алгоритм програми «накладає» шаблон зображення «регіону інтересу».
6. Після цього обчислюються функції кореляційного аналізу, і якщо зображення схоже на шаблон, то на симульований графік показує так звані сплески кореляції.[10]
7. Алгоритм визначає координати цілі, вибираючи ті місця, де знайдені образи найбільше збігаються з шаблоном. На відстані від 100 до 300 метрів деталі цілі стають майже непомітними для матриці низької роздільної здатності, яка є у Джавеліна, через що алгоритм розглядає ціль саме як точковий об'єкт.[11]

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						18
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. У випадку високого відсотку схожості отриманого шаблону із фотографією стає можливим запуск, в протилежному випадку проходить повторення кроків, починаючи з другого.

1.2. Принцип роботи та технічні характеристики ОЕС лазерного наведення.

1.2.1. Лазери, принципи їх роботи і застосування у системах GN&C

Laser (укр. Лазер, аббревіатура від Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) – це пристрій, який перетворює світлову, теплову, електричну або хімічну енергію в когерентний, монохроматичний, поляризований і вузькоспрямований потік випромінювання.

Якщо спростити побудову, то можна сказати, що лазер складається із трьох головних частин:

- Джерела енергії (механізму, що трансформує та передає зовнішню енергію у робочу енергію лазера).
- «Робочого» тіла (активні середовища лазерів, як наприклад кристали чи деяке дорогоцінне каміння по типу рубіна).
- Оптичного резонатора (системи дзеркал, які маніпулюють перетвореною енергією на вході «робочого» тіла і на виході).

Лазерне випромінювання може бути безперервним, з постійною потужністю, або імпульсним, що досягає надзвичайно високих пікових потужностей. У деяких схемах активний елемент лазера використовується як оптичний підсилювач для випромінювання від іншого джерела. Існує багато типів лазерів, які використовують усі стани речовини як робоче середовище. Деякі типи лазерів, такі як лазери на барвниках або поліхроматичні твердотільні лазери, можуть генерувати цілий діапазон частот у широкому спектральному діапазоні. Унікальні властивості лазерного випромінювання дозволяють використовувати їх у різних галузях науки і техніки.

Індуковане випромінювання – процес генерації нового фотону, коли під впливом індукованого фотона атом, молекула чи ядро (квантові системи) переходять із одного стану у інший (змінюють енергетичні рівні).

					ПО01.00008.000 ПЗ	Лист.
						19
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фізичним основою роботи лазера як раз і є явище індукованого випромінювання. Більше детальна суть цього явища полягає в тому, що збуджений атом або інша квантова система можуть випромінювати фотон без його поглинання під дією іншого фотона, якщо енергія останнього дорівнює різниці енергій рівнів атома до і після випромінювання.[13] Випромінений фотон є когерентним до фотона, що його викликав, тобто чисто технічно його можна назвати копією, наближеною до ідеалу, якщо не повністю точною.

Лазерне наведення використовує лазерний промінь для спрямування різноманітних пристроїв із вбудованими системами для розпізнавання подібних сигналів або просто роботизованих систем у задану позицію. Цей метод передбачає проекцію лазерного променя, обробку зображень та зв'язок для підвищення точності наведення. Замість передачі цільових позицій у цифровому форматі, лазерне наведення показує їх системі приладу через лазерну проекцію. Такий підхід робить керування пристроєм більш зрозумілим завдяки візуальному зворотньому зв'язку, що підвищує точність позиціонування та сприяє ефективній роботі.[14] Крім того, систем наведення можуть бути використаними для координації дій декількох пристроїв або установок, незалежно від того, чи вони співпрацюють між собою, чи ні.

Лазерне наведення у наш час, як не складно здогадатися, з більшою активністю використовується саме військовими. Загалом для спрямування ракет або інших снарядів на ціль за допомогою лазерного променя по різних принципах застосування. Ця технологія дозволяє тримати лазер націлено на ціль, під час того, як снаряд або літальний апарат наближається до неї. Лазерне випромінювання відбивається від цілі і розсіюється у різні сторони. Коли частина відбитої від цілі лазерної енергії досягає снаряда, лазерний пошуковий пристрій визначає джерело цієї енергії і коригує траєкторію снаряда в напрямку цього джерела. Поки снаряд знаходиться в зоні дії лазера, який утримується націлено на ціль, він має бути точно наведений на неї. Існують заходи протидії лазерному наведенню, такі як системи виявлення лазерів, димові завіси та активні анти-лазерні системи розсіювання оманливих лазерів, але навіть з використанням цих заходів не завжди можна успішно протистояти цій

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						20
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

технології, оскільки більш розвинені та дорогі версії цих систем є більш ефективними та універсальними, не кажучи вже про той факт, що під час військового стану країни набувають набагато більшої мотивації модернізувати вже існуючі системи або винаходити та розробляти власні унікальні одиниці, інформація про які не є і не буде загальнодоступною протягом тривалого часу.

1.2.2. Керування променем прямої видимості та принцип застосування у військових системах

Beam-riding (укр. Променева «їзда») також відоме як Line-Of-Sight Beam Riding (LOSBR) – це методика наведення ракети на ціль за допомогою радара або лазерного променя, котра полягає в тому, що ракета спрямовується за допомогою променя, який націлений на ціль. Цей метод є одним з найпростіших у системах наведення і широко використовувався у сучасній ракетній техніці. Проте він має обмеження у наведенні на цілі на великій відстані і зараз застосовується переважно для цілей на невеликій відстані, тобто на коротких дистанціях.

Принцип променевої «їзди» базується на направленому сигналі, спрямованому на ціль. Цей сигнал не обов'язково потужний, оскільки не обмежений використанням лише для слідкування. Основне застосування такої системи полягає у знищенні бронетехніки або літальних апаратів. Спочатку станція наведення, можливо навіть встановлена на транспортному засобі, в зоні запуску випускає і направляє вузький радарний або лазерний промінь на ворожий літак або танк. Після цього ракета запускається і певний момент після запуску «захоплюється» радаром або лазерним променем, коли влітає в нього. З цього моменту ракета намагається триматися в промені, тим часом станція наведення утримує промінь на цілі та корегує його за необхідності. Ракета, що керується комп'ютером всередині неї, у певному сенсі «їде» по променю до цілі, що пояснює незвичну назву цього методу наведення.

Завдяки скороченню довжини хвилі, лазерний промінь може мати набагато вужчу кутову роздільну здатність, ніж радіолокаційний промінь, не потребуючи при цьому значного збільшення розміру апертури проектора у порівнянні з іншими оптичними пристроями, що використовуються в стандартних системах наведення для

					ПО01.00008.000 ПЗ	Лист.
						21
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

високоточних боєприпасів. Це дозволяє вбудовувати додаткову інформацію в промінь за допомогою цифрових або електрооптичних засобів, що має численні переваги. Ракети з невеликими оптичними приймачами можуть легко наводитися на лазери, аналогічно до радіолокаційних систем, проте вони стають більш точними завдяки вищій просторовій роздільній здатності кодування променя на цілі. Зокрема, оскільки промінь зазвичай спрямовується безпосередньо на приймач ракети, потрібна набагато менша інтенсивність, ніж у напівактивних конструкціях, де ціль має бути «намальована», а ракета повинна виявити розпливчате відбиття лазера від цілі. Зменшена інтенсивність лазерних систем самонаведення в порівнянні з напівактивними системами лазерного самонаведення може значно ускладнити їх виявлення приймачами лазерного попередження цілі.[15]

Розпливчате відбиття (дифузне відбиття) означає, що світло чи інші хвилі або частинки відбиваються від поверхні таким чином, що промінь розсіюється під різними кутами, а не лише під одним, як у випадку дзеркального відбиття. Ідеальна дифузно відбиваюча поверхня відображає ламбертіанське відбиття, коли вона має однакову яскравість у будь-якому напрямку в півпросторі, що прилягає до поверхні.

Більшість систем лазерного наведення використовують зовнішні або інтегровані у конструкцію лазерні далекоміри (англ. Laser rangefinder), як головні або як допоміжні елементи деякого процесу.

Лазерний далекомір (телеметр) - це прилад, який використовує лазерний промінь для визначення відстані до об'єкта. Одна з найпоширеніших форм лазерного далекоміра працює на основі вимірювання часу прольоту: він відправляє лазерний імпульс у вузькому промені до об'єкта, а потім вимірює час, за який імпульс повертається від цілі до приладу. Оскільки світло рухається дуже швидко, цей метод не є найкращим для вимірювань з високою точністю на субміліметровому рівні, де частіше застосовуються тріангуляція та інші методи.

Успішність роботи пристрою залежить від тривалості наростання відмінностей, потужності лазерного імпульсу, якості оптики та внутрішньої цифрової обробки сигналу. Окрім того, вплив на точність має навколишнє середовище через такі фактори:[16]

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						22
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Наявність вологості, снігу, пилу чи інших частинок у повітрі, які розсіюють сигнал.
- Підвищена температура та атмосферний тиск (нижча висота над рівнем моря), що трохи знижують швидкість світла в повітрі.
- Менші та менш відбивні об'єкти повертають менше інформації.

Умови, коли діють досвідчені оператори з використанням точних лазерних далекомірів, дозволяють визначити відстань до об'єкта з точністю до метра на відстані близько трьох кілометрів.

Далекоміри призначені для точного визначення відстані до об'єктів, які знаходяться поза прямою видимістю, для різних цілей, таких як техніка, установки або військові. Вони можуть бути використані для військової розвідки та інженерного забезпечення.

Ручні військові далекоміри працюють на відстанях від 1 км до 25 км і поєднуються з біноклем або монокуляром. Якщо далекомір має цифровий магнітний компас та кутомір, він може визначати магнітний азимут, нахил та висоту цілей. Деякі моделі далекомірів можуть також вимірювати швидкість цілі відносно спостерігача. Крім того, деякі далекоміри оснащені кабельними або бездротовими інтерфейсами для передачі даних вимірювань на інше обладнання, наприклад, комп'ютери керування вогнем. Деякі моделі можуть також мати можливість використання додаткових модулів нічного бачення. Більшість ручних далекомірів живляться від стандартних або акумуляторних батарей.

Підсумовуючи, можна впевнено сказати, що лазерні далекоміри мають багато сильних та слабких сторін, однак вважаю за потрібне виділити саме наступні, трохи доповнивши вже подану інформацію:

- Більш потужні далекоміри здатні вимірювати відстань до 40 км і подібні моделі можуть бути закріплені на штативі або різних видових транспортних засобах, зокрема на кораблі, літаку, гелікоптері чи гарматній платформі.
- У випадку встановлення на транспортні засоби, далекоміри можуть інтегруватися з усіма згаданими вище системами збільшення якості та варіативності використання, такими як бортові тепловізори, прилади для

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						23
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

нічного та денного спостереження, що забезпечують максимальну ефективність роботи.

- Сучасні моделі далекомірів також часто є комп'ютерно-інтегрованими одиницями техніки.
- Для зменшення ефективності лазерних далекомірів та зброї з лазерним наведенням у військових цілях, різні військові компанії та установи розробляють контрзаходи, наприклад, спеціальну фарбу, яка поглинає лазерні промені для захисту своїх транспортних засобів та літальних апаратів.
- Незважаючи на існування та вже розроблені фарби т.ін. методи зниження ефективності застосування лазерних далекомірів, у світі все ще існує значна кількість природних матеріалів, які погано відбивають лазерне світло, ускладнюючи використання лазерних далекомірів на них.

1.2.3. Принцип роботи систем із використанням лазерного наведення

Чудовими прикладами використання розписаних вище методик лазерного наведення та керування можна назвати таке бойове обладнання як ATGM (укр. ПТКР) системи: наша Стugna-П (також відома як «Skif» - модель Стугни-П, що експортується партнерам) або BGM-71 TOW.

Стugna-П призначена для ураження сучасних броньованих цілей, які можуть мати комбіновану або монолітну броню, включаючи ті, що мають реактивний захист (динамічну броню). У Стugna-П є два режими наведення на ціль: ручне та автоматичне наведення за принципом «вистрілив-забув», останній із яких вже був описаний раніше. Ця система може атакувати як стаціонарні, так і рухомі об'єкти. Використовуючи Стugna-П, можна здійснювати удари як з великої відстані (до 5 кілометрів в денний час), так і з недалекої відстані, до 100 метрів. Вона призначена для поразки конкретних об'єктів, таких як тактично важливі споруди, легкоброньовану техніку та повітряні тіла, які зависають на місці у повітряному просторі. [17]

Стugna-П складається з триноги, панелі дистанційного управління, пристрою наведення та тепловізора. Кожен комплект боєзапасу постачається у власній каністрі.

					ПО01.00008.000 ПЗ	Лист.
						24
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Панель управління є портативним комп'ютером у вигляді портфеля з пультом управління, невеликим джойстиком та плоским дисплеєм, який з'єднаний з вогневою установкою кабелем, що дозволяє використовувати його на відстані до 50 метрів. Описаний раніше режим «вистрілив-забув» забезпечує автоматичне управління польотом ракети за допомогою лазерного променя (променевої «їзди»).

У 2022 році була представлена модернізована версія Стугни-П під назвою "Скіф-М". Ця версія має значні покращення, зокрема: полегшену триногу, оновлений корпус траверси, полегшений пульт дистанційного керування, батареї для живлення пускової установки та пульта, а також новий прицільно-навігаційний комплекс з лазерним далекоміром.



Рис. 1.4. Фото-ілюстрація комплексу Стугна-П

BGM-71 TOW («Tube-launched, Optically tracked, Wire-guided») – американська протитанкова ракетна установка. Вона є носієм потужної боєголовки та значно покращеної напівавтоматичної системи наведення на пряму видимість, яка може бути доповнена інфрачервоними камерами для використання в нічний час.

Американські військові використовують позначення TOW для керованої ракети наземного базування, яка призначена для наземних атак, або як направлену ракету, адже ця установка має велику кількість варіацій та модифікованих версій для різних типів наведення, керування та платформ запуску. [19]

У базовому («стрілецькому») вигляді система складається з таких модулів:

- Складаний штатив на тринозі.
- Пускова труба.
- Блок денного наведення.
- Доступний до встановлення нічний приціл з газовим охолодженням чи

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						25
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

універсальний блок наведення.

- Модуль переміщення, що кріпиться на тринозі і несе пускову трубу і приціл.
- Окремий модуль системи управління вогнем, що виконує всі розрахунки наведення.
- Акумуляторна батарея для живлення системи.

Для виконання задачі (ураження) за допомогою ракети TOW не потрібно опромінювати саму ціль або вимірювати дальність. Наведення ПТКР TOW виконується за допомогою звичайного електронно-оптичного прицілу з лазером. Оператор вирівнює центр прицілу на ціль, виконує пуск, а потім утримує лазер на цілі до попадання ракети. У всіх модифікаціях серійних ракет TOW використовується напіваавтоматичне наведення зі зворотнім зв'язком по трасеру. У прицільному пристрої є координатор, який визначає відхилення трасера від лазера. Залежно від знаку та величини відхилення система наведення генерує команди на керуючий пристрій ракети, що дозволяє цьому комплексу виглядати краще на фоні багатьох аналогів, залишаючись у військовій «моді» із 1970 року і слугувати не тільки надійним інструментом війни, а й чудовою базою для десятків модифікацій.



Рис. 1.5. Фото-ілюстрація комплексу BGV-71 TOW

Висновки до Розділу 1.

Перший розділ я присвятив сучасним аналогам оптико-електронних комп'ютерно інтегрованих систем наведення, в більшості саме ІЧ системам із тепловою головкою і лазерному наведенню по прямому чи відбитому променю, презентувавши та детально пояснивши у яких саме приладах і з якими цілями використовуються подібні інтегровані системи.

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						26
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ТРАКТ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ ОПТИКО- ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ

2.1. Тракт приймального каналу.

2.1.1. Функціонал приймального каналу і поверхнева будова

Функція приймального каналу полягає у відокремленні потрібного сигналу від отриманого приймачем (наприклад антеною, ІЧ приймачем тощо) та його посиленні до необхідного рівня для подальшої обробки детектором. Зазвичай потрібно змінювати частоту отриманого сигналу, щоб мати можливість зчитувати різні канали, оскільки якість прийому значно залежить від відстані між передавальним і приймальним трактами. Сам по собі приймальний тракт, зазвичай, обладнаний підсилювачем з автоматичним регулюванням підсилення для компенсації різниці у рівнях сигналів, котрі надходять йому від передавального тракту.

Однак незважаючи на широкий спектр варіантів застосування, принципів побудови та можливостей застосування, нас цікавлять саме оптичні тракти, адже вони використовуються під час лазерного ІЧ наведення. У ОЕС оптичні тракти (канали) допомагають знайти напрям на об'єкт у широкому полі зору, інакше кажучи, фактично здійснити згадане вище наведення.

Активна ОЕС складається з двох частин – лазерного освітлювача та багатоканального приймального тракту. Багатоканальний тракт приймального типу має наступні складові: оптичну систему, фотодіод, мікроконтролер з підсилювачем, АЦП та блок обробки сигналів, який визначає напрямок на об'єкт, інакше кажучи вторинний випромінювач. У ОЕС є багато каналів (трактів), однак кожен з них має власну оптичну систему та по одному «звичайному» ІЧ фотодіоду. Лазер гармонічно модулюється на одній частоті (780 нм та більше).

2.1.2. Фотодіоди, їх різновиди, особливості будови та режими роботи.

Як було зрозуміло із попереднього підрозділу, фотодіоди грають невимірно

					ПО01.00008.000 ПЗ	Лист.
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		27

валику й важливу роль у роботах не тільки різноманітних ОЕС, а і приймальних трактах (каналах) оптичного типу. Так як у даному проекті буде розглянуто багатоканальний приймальний оптичний тракт, детальний розбір фотодіодів, їх видів і деталей їх роботи на ряду з режимами є дуже важливим задля загального розуміння всіх аспектів проекту.

Фотодіод – це напівпровідниковий пристрій з так званим Р-Н переходом (також відомий, як електронно-дірковий перехід), котрий перетворює фотони, тобто світло, у електричний струм. Р-шар містить в собі багато позитивних зарядів (так званих «дірок»), тоді як N-шар має велику кількість негативних зарядів (електронів). Фотодіоди можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як германій, галій тощо. В свою чергу, кожен матеріал використовується для експлуатації їх унікальних властивостей, які можуть бути спрямовані на зниження вартості, підвищення чутливості, розширення робочого діапазону по довжинам хвиль, зменшення рівня шуму або навіть покращення швидкості реакції (відгуку).

Фактично, весь базовий принцип роботи фотодіоду лежить у створенні так званої зони збіднення у Р-Н переході. Під час переходу електронів з одного шару до іншого та дірок у зворотньому напрямку створюється зона збіднення, яка розділяє ці два шари. Цей процес породжує внутрішню напругу, що формує електричне поле в межах зони збіднення. Даний процес забезпечує протікання струму лише у одному напрямку – від анода до катода. Хоча фотодіод може бути зміщений вперед, струм, який виникає, буде рухатися в зворотньому напрямку, через що більшість фотодіодів використовують зворотне зміщення або ж не використовують зміщення взагалі. [20] Більшість фотодіодів в принципі не можуть бути зміщені в прямому напрямку без високого шансу пошкодження їхньої конструкції.

При враженні атомів фотонами (бомбардуванні) всередині пристрою, фотон може вибити якісь атоми та електрони, якщо він має достатню кількість енергії. Цей процес призводить до утворення електронно-діркової пари. Якщо фотони поглинаються у Р-Н шарах, електронно-діркові пари перетворюються в тепло у матеріалах, якщо вони знаходяться на достатній для цього відстані від самої області збіднення. Фотони, які поглинаються у зоні збіднення, створюють електронно-діркові пари, котрі, через дію

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						28
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

електричного поля, рухаються в різних напрямках. Електрони рухаються до позитивного заряду на катоді, а «дірки», відповідно – до негативного заряду на аноді. Власне, саме ці рухливі носії заряду і утворюють струм у фотодіоді.

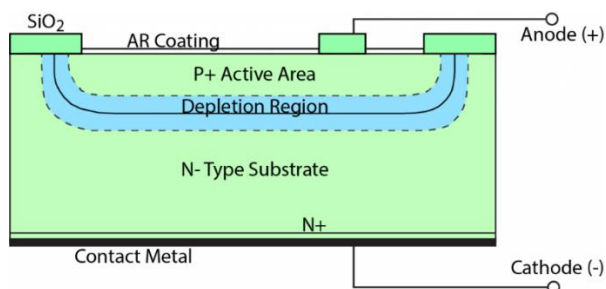


Рис. 2.1. P-N перехід у стандартних фотодіодах [20]

Всього на ефективність роботи фотодіоду впливає не так багато факторів, однак з них я вважаю за потрібне виділити шість основних:

- Чутливість фотодіоду
- Швидкість відгуку
- Температура
- Пробивна напруга
- Темновий струм
- Матеріали

Чутливість фотодіода визначається як відношення фотоструму, що генерується під впливом світла, до потужності цього світла. Зазвичай це виражається як співвідношення струму до напруги.

Час і швидкість відгуку фотодіода залежать від ємності його P-N переходу, що визначає час, котрий необхідний носіям заряду задля подолання P-N переходу. Фактично, ширина зони виснаження має прямий вплив на цей процес.

Пробивна напруга є фактично найбільшою оберненою напругою, яку можна застосовувати до фотодіода до початку зростання струму витoku, важливо підмітити, що ріст є експоненційним, або темнового струму. Враховуючи особливість будови, використання фотодіодів при напрузі нижче цієї зворотної напруги може призвести до пошкодження пристрою.

Темновий струм – це струм, що протікає через фотодіодах, коли ті не мають доступу до фотонів (світла). Подібне явище може бути одним із основних джерел

шуму в системі фотодіода, що буде розглянуто докладніше пізніше. Зазвичай, для визначення величини темного струму фотодіоди розміщують умови, де вони ізольовані від світла.

Температура напряду впливає на явища темного струму і пробивної напруги відповідно, через що вона і була згадана вище. Темновий струм збільшується із ростом температури, в той час як пробивна напруга спадає і навпаки у відповідності для обох явищ.

Матеріали з яких виготовляються фотодіоди, мають доволі різні спектри чутливості. Для роботи з ІЧ лазерами гарно підійде кремній, наприклад. Адже він має гарну чутливість до довжин хвиль від 400 нм до 1000 нм і розкриває свої якості у цьому плані при роботі із хвилями високих довжин близько 900 нм. [20]

Фотодіоди працюють у двох типах, кожен з яких має свої особливості та причини для застосування:

- **Фотоелектричний режим:**

Анод і катод отримують фотострум через коротке замикання в фотоелектричному режимі (тобто при нульовому зміщенні). Пряме зміщення діода, або обернення анода позитивним до катода, досягається, коли ланцюг розімкнутий або опір навантаження обмежує фотострум від виходу з пристрою. Прямий струм може споживати весь або частину фотоструму, якщо коло замкнено або опір низький. Напруга з невеликим прямим струмом, у порівнянні з фотоелектричним струмом, повинна використовуватися для роботи фотоелектричної комірки задля оптимального виходу потужності.

- **Фоторезисторний режим:**

Катод приводиться в дію позитивно по відношенню до анода в фотопровідному режимі, що є результатом зворотного зміщення діода. Збільшуючи ширину зони виснаження з додатковим зворотним зміщенням, час відгуку зменшується, що призводить до зменшення ємності з'єднання та збільшення області з електричним полем, що призведе до швидкого збору електронів. Темновий струм також генерується зворотним зміщенням без особливих змін у фотострумі. Незважаючи на швидкість, фотопровідний

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						30
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

режим все ще може виробляти більше електронного шуму через темний струм або лавинні ефекти.

В даному контексті не менш важливо буде згадати і про існування фотодіодів PIN типу та Лавинного типу задля кращого розуміння режимів роботи фотодіодів:

Фотодіоди, які використовують лавинний ефект, забезпечують внутрішнє підсилення в матеріалі за допомогою імпульсної іонізації. Ці фотодіоди потребують високого зворотного зсуву, що дозволяє кожному носієві заряду генерувати додаткові пари, які у свою чергу спричиняють лавинний пробій. Такий процес призводить до внутрішнього підсилення у фотодіоді, що збільшує струм, який генерується від одного фотона, підвищуючи ефективну чутливість пристрою.

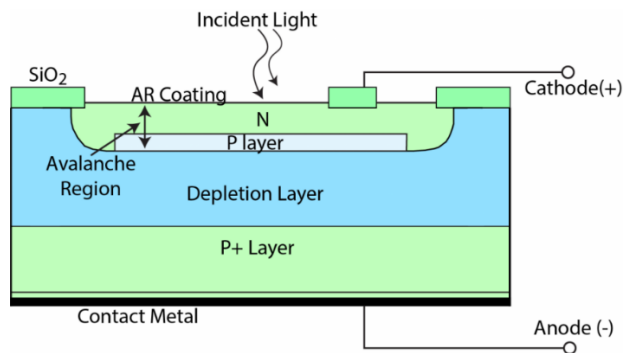


Рис. 2.2. Перехід у фотодіодах Лавинного типу [20]

PIN-фотодіод не дуже сильно відрізняється від P-N типу, фактично, відмінність лише одна. Замість того, аби об'єднувати P і N шари для створення зони збіднення, між двома доповненими шарами встановлюється інтрузивний шар. [20] Даний шар має високий опір і збільшує напруженість електричного поля у фотодіоді. Додавання інтрузивного шару має безліч переваг, оскільки зона виснаження значно збільшується. Ємність переходу зменшується, що призводить до збільшення швидкості фотодіода. Посилене втручання також забезпечує більший обсяг перетворення фотона в електронну дірку і підвищує квантову ефективність.

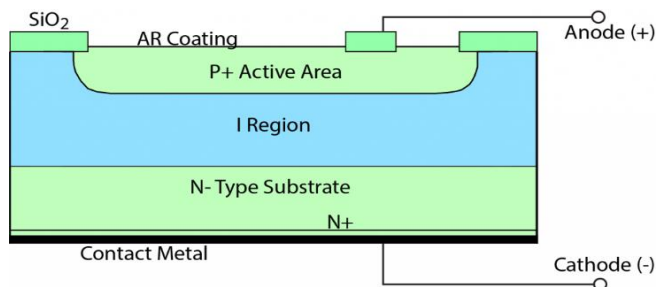


Рис. 2.3. Перехід фотодіоду PIN типу [20]

Моніторний фотодіод, який інтегрується в пакет лазерних діодів, використовується для вимірювання оптичної потужності вихідного лазерного променя. Основним його завданням є генерація струму, який частково пропорційний оптичній потужності лазера. Цей фотодіодний струм може бути використаний для зворотного зв'язку у системі керування, де регульоване джерело струму змінюватиметься для підтримки постійного рівня оптичної потужності.

Основні моменти щодо використання моніторного фотодіода в лазерних системах:

- Зворотний зв'язок: Фотодіодний струм може бути використаний для зворотного зв'язку, який допомагає системі управління підтримувати стабільну оптичну потужність.
- Регуляція потужності: Регульоване джерело струму забезпечує зміну струму для підтримки постійного рівня оптичної потужності.
- Лазерний діодний паспорт: Функція передачі фотодіодного струму і вихідної потужності лазерного діода зазвичай наведена в лазерному діодному паспорті.
- Обмеження опцій та інформації: Фотодіоди, які вже вбудовані в лазерну систему, можуть мати обмежену доступну інформацію, таку як максимальна зворотна напруга та чутливість фотодіода.

Цей підхід дозволяє стабілізувати оптичну потужність лазера і підтримувати її на постійному рівні за допомогою моніторного фотодіода та системи керування.

2.2. Теорія сигналів та шумів і підсилення сигналів на фотодіодах.

2.2.1. Сигнали, шуми, їх відмінності та вплив на роботу різноманітних приймальних трактів та аналізаторів.

Сигнали та шуми є невід'ємними складовими будь-якої роботи із отриманням інформації через різноманітні приймачі. Вони існували і будуть існувати завжди, тому під час обробки отриманої інформації, котра буде включати у себе ці два аспекти, необхідно розуміти як вони працюють, які у них головні відмінності і яким

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						32
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

чином вони взаємодіють між собою. Саме через це, вважаю необхідним з самого початку розібратися із тим, що таке сигнал і що таке шум.

З точки зору фізики, як науки, що вивчає природні явища та їх взаємодію, шум і сигнал дійсно можуть розглядатися як коливання, що поширюються через середовище, таке як повітря або вода. Обидва можуть бути представлені у вигляді хвиль, які переносять енергію та інформацію.

Проте, коли розглядається сприйняття сигналу та шуму людським мозком, виникає відчуття різниці між ними. Людський мозок має здатність обробляти інформацію, яка надходить через наші сенсорні системи (наприклад, слухову систему для звуків). Мозок може класифікувати ці сигнали на основі контексту, оточення та діяльності, яка відбувається в даний час.

Отже, хоча з фізичної точки зору шум і сигнал можуть бути розглянуті як коливання, які поширюються через середовище, з погляду сприйняття та обробки інформації людським мозком вони можуть бути розрізнені і зрозумілі по-різному в залежності від контексту та ситуації.

Відмінності між шумом і сигналом:

1. Шум:

- Небажані перебої: Шум – це будь-які злоякісні сигнали або випадкові перебої, що можуть виникати у процесі передачі або отримання даних.
- Відсутність інформації: Шум не несе в собі корисної інформації і може спричиняти спотворення справжнього сигналу.
- Може виникнути внаслідок різних факторів: Шум може бути результатом електромагнітних перешкод, технічних артефактів або природних впливів.

2. Сигнал:

- Корисна інформація: Сигнал – це якісна інформація, яка передається в комунікаційній системі.
- Мета передачі даних: Сигнал містить корисну інформацію або комунікативний зміст, який необхідно передати.
- Оброблюваний отримувачем: Отримувач може обробити сигнал для витягнення корисної інформації.

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						33
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

У комунікаційних системах чи системах зчитування (прийому) інформації важливо розрізняти відмінності між шумом і сигналом, оскільки шум може спричиняти спотворення сигналу та втрату інформації. Ефективне управління шумом дозволяє покращити якість передачі даних та забезпечити надійну комунікацію між взаємодіючими пристроями.

Сигнал можна розглядати як форму передачі даних з однієї точки в іншу за допомогою електромагнітного поля або електричного струму. У глибоких системах зв'язку, електротехніці та обробці сигналів, сигнал розглядається вже як функція, яка передає інформацію про атрибути або поведінку певного явища. Також це може означати будь-яку спостережувану зміну в об'єкті, яка може бути оцінена кількісно і, відповідно, передана.

Загалом, сигнали поділяють на дві основні категорії – це цифровий та аналоговий. Однак навіть вони поділяються на ще більш детальні, а саме:

- **Зображення:**

Зображення складається з кольорових або яскравісних сигналів. Об'єкт, який сприймається як зображення, виглядає як відбита або випромінювана електромагнітна хвиля, що представлена у формі електронного сигналу.

- **Рух:**

Рух може бути розглянутий як сигнал, коли об'єкт здійснює переміщення. Цей сигнал можна відслідковувати за допомогою різноманітних датчиків, які генерують відповідні сигнали.

- **Звук:**

Звук по природі є коливаннями у деякому середовищі, наприклад, у воді, повітрі або . Щоб звук був розглянутий як сигнал, він повинен бути перетворений на електричний сигнал за допомогою мікрофона. Він пов'язує значення тиску зі значеннями часу та трьох просторових координат.

Цифрові сигнали використовуються для точного кодування та передачі інформації, тоді як аналогові сигнали використовують безперервні змінні для представлення даних. Розуміння різниці між цими типами сигналів допомагає в розвитку технологій та комунікаційних систем і просто більш професійній та

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						34
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

детальній роботі з вже існуючими технологіями та системами.

Шум, як частина нашого повсякденного життя, зустрічається не лише при роботі із сигналами на різноманітних приймальних трактах. Саме тому, перед тим як працювати із шумом, треба розуміти та вміти розрізняти різноманітні типи шумів, однак я вважаю необхідним виділити чотири основних:

- **Безперервний шум:**

Це тип шуму, який має стійку, постійну звукову характеристику. Її можна порівняти з шумом вентилятора або автомобільного двигуна, де звук триває без змін протягом тривалого часу. Безперервний шум може бути досить монотонним та одноманітним.

- **Преривчастий шум:**

Цей тип шуму характеризується періодичними перериваннями у виникненні звуку. Прикладом може бути шум механічної ручки або тикаючих годинників. Преривчастий шум може бути більш різноманітним у порівнянні з безперервним шумом.

- **Імпульсний шум:**

Це короткочасний шум, який виникає унаслідок раптових звукових подразників. Такий шум може бути дуже гучним та різко відрізнятися від інших рівнів звуку. Прикладом імпульсного шуму може бути звук вибуху чи пострілу.

- **Низькочастотний шум:**

Це шум, який має низькі частоти і може бути менш сприятливо сприйнятим людиною порівняно з високочастотними шумами. Він може бути характерний для деяких механічних систем або навіть природних явищ, таких як гроза. Низькочастотний шум може викликати відчуття дискомфорту та навіть впливати на здоров'я людини у великих дозах.

Однією з основних різниць між сигналом і шумом є те, що сигнал навмисно створюється для передачі корисної інформації, тоді як шум виникає випадково і не містить корисних даних. Сигнал спрямований на донесення конкретного повідомлення, тоді як шум є небажаним явищем, яке може заважати сприйняттю

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		35

цього повідомлення. Відтак, сигнал має певну частоту або структуру, що піддається розшифруванню, в той час як шум є хаотичним і непередбачуваним.

Додатково, сигнали зазвичай мають більшу інтенсивність порівняно з шумом. Для того щоб сигнал успішно подолав наявні перешкоди, його сила повинна бути достатньою. Якщо сигнал занадто слабкий, шум може його заглушити, що утруднить розшифрування повідомлення. Таким чином, потужний сигнал є необхідним для точної і надійної передачі інформації.

Ще один аспект, за яким відрізняються сигнал і шум, це методи їх вимірювання. Сигнал зазвичай характеризується амплітудою, частотою і фазою, тоді як шум часто оцінюється за співвідношенням сигнал/шум. Це співвідношення визначає відносну потужність сигналу порівняно з шумом. Більші показники цієї різниці означають, що сигнал переважає над шумом, тоді як менші показники різниці свідчатимуть про домінування шуму.

2.2.2. ІЧ приймачі, сенсори та дистанційне керування.

Як вже було згадано та пояснено вище, ІЧ датчики, сенсори та приймачі мають дуже широкий спектр сфер, у яких фони можуть бути застосовані. Особлива увага, очевидно, була надана експлуатації цих технологій та систем саме у військовій сфері на прикладі систем лазерного наведення, таких як самонаведення по ІЧ випроміненню, по прямому променю (променева «їзда») і по відбитому променю. Також існують системи наведення на яскраве точкове джерело з використанням лазерів і по куту між напрямки на об'єкт. Все ці методи наведення об'єднують лазери, різної частоти та з різною довжиною хвиль їх випромінення, але я сфокусуюся саме на ІЧ випроміненні і його експлуатації у системах наведення, адже саме подібна система є базисом і головною частиною для цього проекту.

Тим не менш, для інтегрування будь-якої системи треба розібрати її базис, як було розібрано більш малі деталі та конструкції вище:

Інфрачервоний датчик – це важливий електронний пристрій, який здатний виявляти інфрачервоне випромінювання і використовується для різних цілей в електроніці та автоматизації, як вже було пояснено на прикладах. Надалі я розберу

					ПО01.00008.000 ПЗ	Лист.
						36
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

головні аспекти, щодо призначення, роботи і складу самих датчиків:

- Призначення: Інфрачервоні датчики використовуються для вимірювання тепла об'єктів, виявлення руху, а також для виявлення перешкод або об'єктів, які випромінюють інфрачервоне випромінювання.
- Робота датчика: Інфрачервоні датчики працюють за принципом виявлення змін в інтенсивності інфрачервоного світла, що випромінюється об'єктами. Вони можуть бути "пасивними", що означає, що вони лише сприймають і реагують на інфрачервоне випромінювання, а не випромінюють самі.
- Складові датчика: Типова схема інфрачервоного датчика включає в себе інфрачервоний світлодіод (випромінювач) і інфрачервоний фотодіод (детектор). Світлодіод випромінює інфрачервоне світло, яке потім виявляється фотодіодом, який реагує на це світло.
- Принцип роботи: Коли інфрачервоне світло випромінюється об'єктом і падає на фотодіод датчика, опір та вихідна напруга фотодіода змінюються, що дозволяє вимірювати інтенсивність отриманого інфрачервоного світла.

Інфрачервона система зв'язку складається з двох основних компонентів – інфрачервоного передавача та інфрачервоного приймача.

Інфрачервоний передавач зазвичай має зовнішній вигляд, схожий на звичайний світлодіод, але він випромінює світло в інфрачервоному спектрі, що невидимо для людського ока. Його основна функція полягає в передачі інформації чи сигналу через інфрачервоне випромінювання. Він використовується для бездротового передавання даних на короткі відстані.

Інфрачервоний приймач також може виглядати схоже на світлодіод, але його функція полягає в прийомі інфрачервоного сигналу. Призначення інфрачервоного приймача – це отримання інформації, яку передає інфрачервоний передавач. Приймач перетворює інфрачервоне випромінювання на електричний сигнал для подальшого оброблення.



Рис. 2.4. Фото-ілюстрація інфрачервоного приймача

Метод модуляції сигналу в інфрачервоних пристроях є важливим для зменшення впливу світлового шуму від інфрачервоного випромінювання, яке навколо нас генерується різними джерелами тепла, такими як сонце, лампочки та інші об'єкти. Основні етапи модуляції інфрачервоного сигналу у використанні інфрачервоних пультів та пристроїв наступні:

- Кодування сигналу: Кодер на інфрачервоному пульті перетворює двійковий сигнал (інформацію для передачі) на модульований електричний сигнал.
- Передача сигналу: Модульований електричний сигнал надсилається на передавальний інфрачервоний світлодіод.
- Перетворення сигналу: Передавальний світлодіод перетворює модульований електричний сигнал на модульований інфрачервоний світловий сигнал для передачі.
- Прийом сигналу: Інфрачервоний приймач отримує модульований інфрачервоний світловий сигнал, демодулює його та перетворює на електричний сигнал.
- Декодування сигналу: Отриманий електричний сигнал декодується для відновлення початкового двійкового сигналу, який містить інформацію.

Даний процес дозволяє ефективно передавати інформацію через інфрачервоне випромінювання та сприяє підвищенню надійності та стійкості комунікації в умовах з високим рівнем шуму в ІЧ-спектрі, приклади, джерела та вплив яких вже був детально розібраний вище.

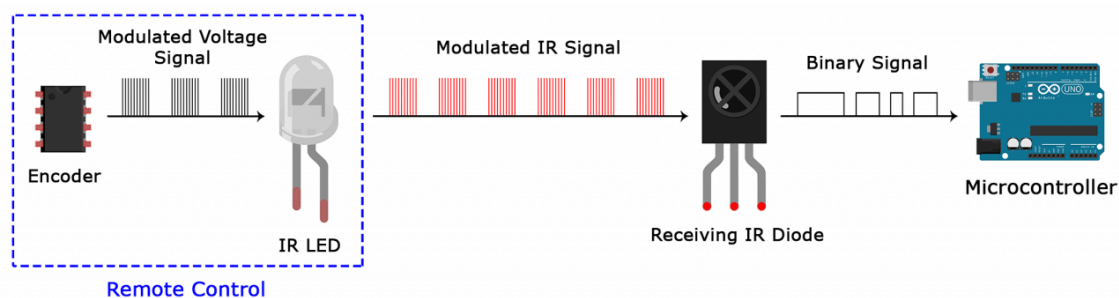


Рис. 2.5. Візуалізація роботи ІЧ-приймача [23]

Модульований інфрачервоний сигнал має деякі особливості, які дозволяють ефективно передавати та отримувати дані через інфрачервоне випромінювання. У процесу модулювання сигналу є дві головні складові – це самі характеристики сигналу, що модулюється і процес отримання та перетворення самого сигналу, однак останнє вже було розібрано вище.

Характеристики модульованого інфрачервоного сигналу:

- Серія інфрачервоних світлових імпульсів: Сигнал складається з імпульсів, які вмикаються та вимикаються на високій частоті.
- Несуча частота: Частота, яка використовується для модуляції сигналу, зазвичай становить 38 кГц для відрізнення від навколишнього шуму. [23]
- Фільтрація і підсилення: Діод приймача має смуговий фільтр, що пропускає лише інфрачервоне випромінювання на частоті 38 кГц. Після цього сигнал підсилюється попереднім підсилювачем для подальшої обробки. [23]

Протокол передачі ІЧ-сигналів визначає схему, за якою модульований ІЧ-сигнал перетворюється на двійковий код. Існують різні протоколи передачі ІЧ-сигналів, серед них найпоширеніші:

- Sony: Використовується у багатьох пристроях Sony, як не дивно.
- Matsushita: Використовується у пристроях Panasonic.
- NEC: Один із найпоширеніших протоколів, що використовується в багатьох побутових електронних приладах. Він є одним з найпопулярніших типів в проектах Arduino.
- RC5: Ще один поширений протокол передачі ІЧ-сигналів, він досить поширений у системах керування та взаємодії з електронікою..

Протокол NEC є популярним в проектах із застосуванням Arduino через його

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		39

широке застосування та сумісність з багатьма пристроями та модулями, що використовують ІЧ-сигнали.

У випадку при роботі із ручним керуванням системи ІЧ приймач-віддалений контроль при натисканні кнопки на пульті дистанційного керування генерується унікальний шістнадцятковий код, який модулюється та передається по інфрачервоному каналу до приймача. Для того, аби ідентифікувати, котра саме з клавіш була натиснута, мікроконтролер приймача повинен знати, який саме код було назначено і як він відповідає кожній клавіші на пульті. [23]

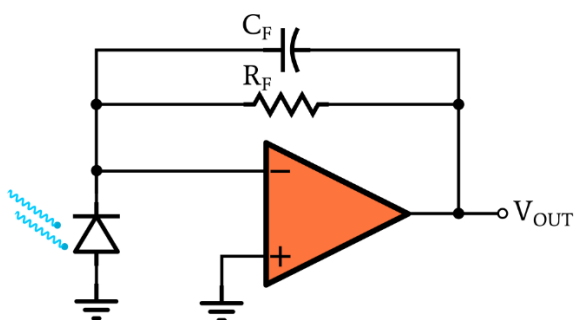


Рис. 2.6. Схема підключення фотодіоду до транзисторного підсилювача [24]

2.2.3. Підсилення сигналу на фотодіоді за допомогою операційного підсилювача.

Коли фотодіод поглинає світло, то генерується струм дуже низької амплітуди. Цей струм може бути використаний як вхідний сигнал для підсилювача транзистора на основі операційного підсилювача. А операційний підсилювач, в свою чергу – це електронний пристрій, який може підсилювати сигнали. Спочатку фотодіод підключається до неінвертуючого входу операційного підсилювача. Після підключення фотодіода до операційного підсилювача, струм, що генерується фотодіодом, може бути підсилено і використано для подальшої обробки сигналу або контролю рівня освітленості. Цей метод дозволяє ефективно використовувати низькі амплітуди струму, що генерується фотодіодом, у різних додатках, де потрібно вимірювати світлові сигнали або просто підлаштовуватися під різноманітні умови, у яких має працювати вся система.

У представленій схемі, роль підсилення виконує виключно резистор.

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						40
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конденсатор, в свою чергу, призначений для запобігання виникненню коливань, спричинених внутрішньою ємністю переходу фотодіода. Ця ємність створює полюс у системі зворотного зв'язку, і конденсатор компенсує це, утворюючи нуль в мережі зворотного зв'язку. [24]

Коливання є серйозною проблемою у фотодіодних схемах. Хоча внутрішня частотна компенсація зазвичай допомагає уникнути нестабільності в операційних підсилювачах, фотодіодні підсилювачі можуть все одно зазнавати коливань навіть при використанні операційних підсилювачів з внутрішньою компенсацією.

В будь-якому випадку, варто розглянути також і можливість додавання невеликої напруги зсуву при проектуванні системи з одним джерелом живлення. Це допоможе уникнути saturation (укр. насичення) операційного підсилювача на негативній шині.

Термін «насичення» зазвичай застосовується до транзисторів і означає стан, коли транзистор повністю відкритий і пропускає максимальний струм від колектора до емітера. У режимі насичення транзистор працює як закритий перемикач з мінімальним опором між колектором і емітером.

Хоча насичення не є критичною проблемою, операційні підсилювачі не призначені для ефективною роботи з вихідною напругою, близькою до напруги живлення, на відміну від тих же компараторів. Коли операційний підсилювач перебуває в стані насичення, йому потрібно деякий час, щоб повернутися до нормального режиму роботи. Тому, якщо підсилювач насичується на від'ємній шині, це може призвести до затримки його реакції на вхідний сигнал.

Висновки до Розділу 2.

Другий розділ проекту був присвячений детальному розгляду головних робочих компонентів проекрованої системи з математичної точки зору. У ньому була надана ретельна увага фотодіодам, їх різновидам, режимам роботи та принципам створення на рівні із приймальними оптичними трактами. На основі цієї інформації далі була розібрана теорія шумів та сигналів і вплив цих типів інформації на роботу ІЧ приймачів задля кращого розуміння та вмотивування використання деяких інженерних, технічних та енергетичних рішень

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						41
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ.

3.1. Загальні габаритні розрахунки.

3.1.1. Встановлення деталей та компонентів, які необхідно включити у габаритні розрахунки.

Основні параметри, які нам потрібно врахувати:

Тип системи: Активна оптико-електронна система наведення з лазерною підсвіткою об'єкту.

Кутове поле зору: Не менше ± 30 кутових градусів.

Максимальна робоча відстань: Не менше 30 м.

Кількість каналів: Від 7 до 32.

Спектральний діапазон роботи: Від 0.8 до 1.0 мкм.

Габарити: Діаметр не більше 80 мм, довжина не більше 80 мм.

Детальний план і роз'яснення щодо кожного аспекту габаритного розрахунку:

1. Кутове поле зору

Для забезпечення кутового поля зору ± 30 кутових градусів, треба підібрати відповідну оптичну систему, яка забезпечить такий огляд. Виходячи з цього, можемо визначити діаметр лінзи та фокусну відстань.

2. Максимальна робоча відстань

Лазерна підсвітка повинна мати достатню потужність, щоб забезпечити висвітлення об'єкта на відстані 30 м. Це буде залежати від характеристик лазера, таких як потужність, довжина хвилі, і ефективність передавача та приймача.

3. Кількість каналів

Необхідно знайти шлях забезпечити від 7 до 32 каналів для оптичної системи. Це означає, що система повинна мати відповідну апаратуру для роботи з цими каналами.

4. Спектральний діапазон роботи

Спектральний діапазон роботи в 0.8-1.0 мкм вказує на необхідність вибору

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						42
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідних фотодетекторів та лазерних діодів, які працюють в цьому діапазоні.

5. Габарити

Габарити в межах діаметра 80 мм і довжини 80 мм означають, що всі компоненти повинні бути компактно розміщені в корпусі цих розмірів.

Для подальших інженерних розрахунків необхідно детальніше розглянути кожен з цих аспектів.

Головні складові, що впливають на аспекти габаритних розрахунків:

- Компоновка оптичної системи (лінзи, дзеркала).
- Розміщення електронних компонентів.

Для розміщення оптичної та електронної системи в корпусі розміром 80 мм × 80 мм потрібно детально розглянути компоновання. Сучасні оптико-електронні компоненти можуть бути досить компактними.

- Лінзи та дзеркала: Використання високоякісних оптичних компонентів з малими розмірами.
- Лазерний діод: Вибір компактного лазерного діода з необхідною потужністю та ефективністю.
- Фотодетектори: Розміщення фотодетекторів, які працюють в діапазоні 0.8-1.0 мкм, у компактному форматі.
- Електроніка: Компактна електроніка для обробки сигналів.

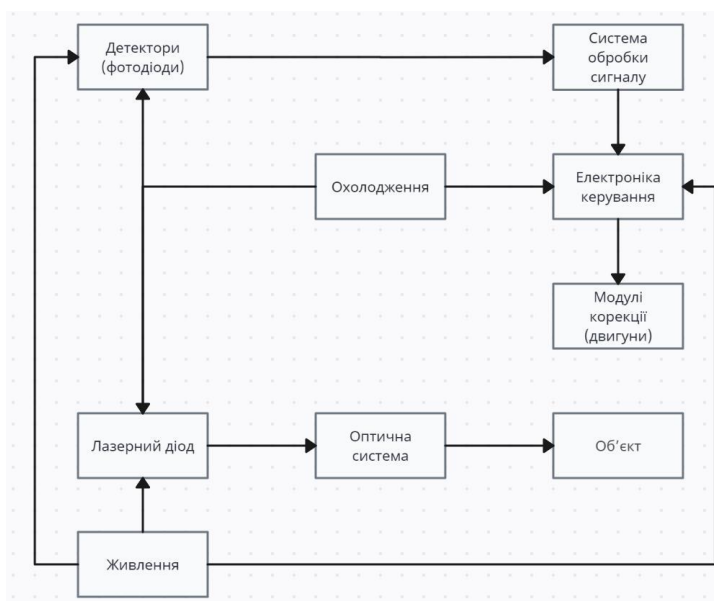


Рис. 3.1. Функціональна схема системи.

3.1.2. Фактичні габаритні розрахунки.

Щоб провести більш детальні габаритні розрахунки для оптико-електронної системи наведення з лазерною підсвіткою, слід врахувати всі компоненти системи та їх розміщення у корпусі розміром 80 мм × 80 мм. Основні компоненти включають:

1. Лазерний діод
2. Оптична система (лінзи, дзеркала)
3. Фотодетектори
4. Електроніка (плата управління, підсилювачі)

Габарити компонентів:

Для проведення більш детальних габаритних розрахунків оптико-електронної системи наведення з лазерною підсвіткою об'єкту, враховуючи обмеження по розмірам (діаметр не більше 80 мм, довжина не більше 80 мм), потрібно розглянути розміщення основних компонентів всередині корпусу:

1. Лазерний діод і оптична система
2. Детектори (фотодіоди або ПЗС-матриця)
3. Електроніка управління та обробки сигналів
4. Живлення та охолодження

1. Лазерний діод і оптична система:

Лазерний діод має бути розміщений так, щоб забезпечувати ефективне освітлення об'єкта на відстані 30 м. Для цього можуть бути використані колімуючі лінзи. Припускаю, що колімуюча система займає приблизно 20 мм в довжину.

2. Детектори:

Для системи з кількістю каналів від 7 до 32 можуть використовуватися масиви фотодетекторів або ПЗС-матриці. Із загально доступної інформації, припускаю, що кожен детектор займає площу 5 мм². В залежності від розміру масиву, потрібно враховувати розміщення детекторів у площині діаметром до 80 мм.

3. Електроніка управління та обробки сигналів:

Сучасні мікроконтролери і плати обробки сигналів можуть бути досить

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						44
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

компактними. Припускаю, що електроніка займає площу 40 мм х 40 мм з можливістю розташування в два шари для збереження простору.

4. Живлення та охолодження:

В залежності від потужності лазера і споживання електроніки, система живлення має включати компактні акумулятори. Система охолодження може бути пасивною (радіатор) або активною (вентилятор).

Габаритне компонування:

Для продовження роботи, пропоную уявити компонування всіх елементів у корпусі розміром 80 мм х 80 мм:

Лазерний діод з оптичною системою (довжина 20 мм):

Розміщення в передній частині корпусу для забезпечення ефективного освітлення.

Детектори (масив від 7 і до 32 детекторів по 5 мм²):

Розміщення на площині перед лазерним діодом або по бокам, загалом головне забезпечувати вільний огляд на площу, яку може охоплювати вказівний лазер.

Електроніка (плата 40 мм х 40 мм):

Може бути розташована в два шари по висоті, займаючи не більше 20 мм у висоту.

Живлення та охолодження (20 мм):

Відведення тепла через корпус або з використанням радіаторів/вентиляторів.

Приблизне схематичне компонування:

Висота лазерного діода з оптичною системою: 20 мм

Висота детекторів: 20 мм

Висота електроніки: 20 мм

Висота системи живлення та охолодження: 20 мм

Загальна висота: 80 мм (що відповідає обмеженням).

Тепер можу більш детально розглянути компонування і переконатися, що всі компоненти вміщаються в корпусі розміром 80 мм х 80 мм:

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						45
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розміщення компонентів:

Передня частина: лазерний діод і оптична система (20 мм)

Центральна частина: детектори (20 мм)

Задня частина: електроніка (20 мм)

Задня частина: система живлення та охолодження (20 мм)

Перевірка габаритних параметрів:

Загальна висота всіх компонентів складає 80 мм, що відповідає обмеженням. Розміщення компонентів по діаметру 80 мм також забезпечує відповідність габаритним обмеженням.

Таким чином, компонування основних елементів у межах заданих габаритів є можливим. Це дає змогу отримати базове уявлення про розміщення компонентів всередині корпусу та можливість подальшої оптимізації розміщення для забезпечення стабільної та ефективної роботи системи.

Габаритний розрахунок для ОС:

Діаметр ОЕС зменшую до 40 мм для узгодження із ВОГ.

Кількість каналів: 7

Обираю поле зору каналу: $\pm 10^\circ$

Кут між каналами: 20°

Звідки маю наступне:

$$\omega_s = \pm 30^\circ$$

$$\varphi = 20^\circ$$

$$\omega_c = \pm 10^\circ$$

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						46
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

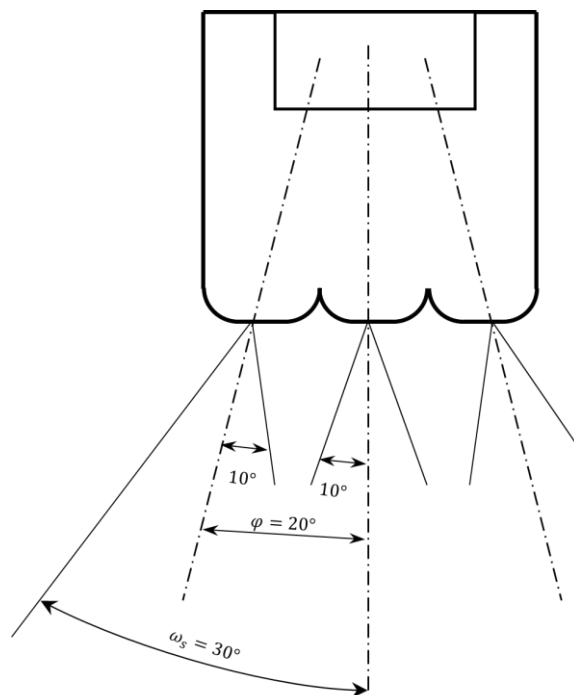


Рис. 3.2. Оптична схема-ілюстрація системи наведення.

Так як діаметр ОС обмежується габаритом ОЕС (40 мм), враховуючи розмір корпусу, обираю $D_{oc} = 10$ мм.

Розрахунок фокусної відстані:

Фокусну відстань можна виразити із наступної формули:

$$tg(\omega_c) = \frac{0,5 * d_{ph}}{f'} \quad (3.1.1)$$

де d_{ph} - це діаметр фоточутливої області фотодіода або його лінзи.

Так як d_{ph} дорівнює 3 мм, маю наступні розрахунки:

$$f' = \frac{0,5 * 3}{tg(10^\circ)} = 8,5 \text{ мм}$$

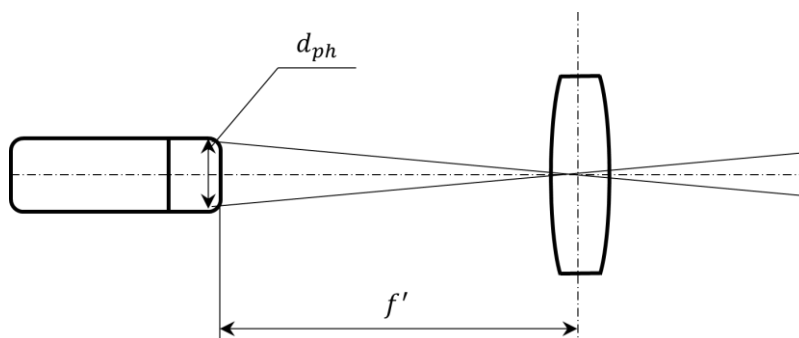


Рис. 3.3. Оптична схема-ілюстрація знаходження фокусної відстані та діаметру фоточутливої області фотодіода.

Розрахунок апертурного кута та числової апертури:

$$G = \operatorname{atan}\left(\frac{0,5 \cdot D_{\text{oc}}}{f'}\right) = 30,44^\circ \quad (3.1.2)$$

$$NA = n \cdot \sin(G) = 0,507 \quad (3.1.3)$$

де n – це апертурний кут, що дорівнює 1.

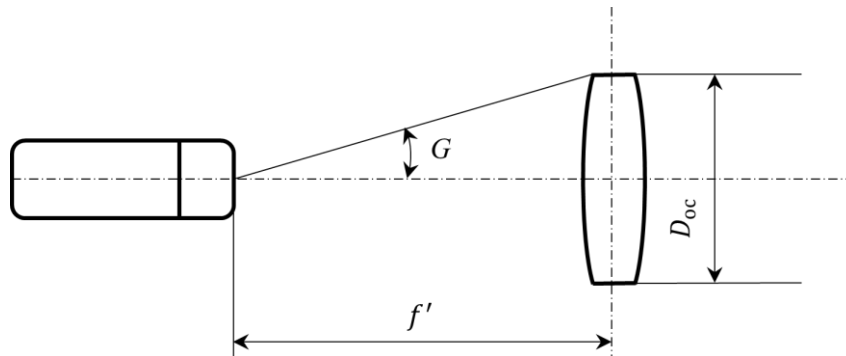


Рис. 3.4. Оптична схема-ілюстрація знаходження апертурного кута.

Розрахунок роздільної здатності:

Розрахунок проводиться за критерієм Релея:

$$d_{\min} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{NA} = 0,0023 \text{ мм} \ll d_{ph} \quad (3.1.4)$$

де λ – це довжина хвилі і дорівнює 0,96 мкм.

Розрахунок ОС:

Для подальшого розрахунку обираю полімер EASKY S88:

Прозорість: 0,25 – 2,5 мкм.

$n = 1,4977$ ($\lambda = 0,96$ мкм)

Коефіцієнт поглинання: $a = 0,122 \text{ см}^{-1}$

Звідки маю наступне:

$$\frac{dn}{d\lambda} = -0,1 \text{ мкм}^{-1} \quad (3.1.5)$$

За формулою двокомпонентної ОС підбираю наступні показники:

$r_1 = 7 \text{ мм}$

$r_2 = -7 \text{ мм}$

$d = 7,3 \text{ мм}$

$D = 10 \text{ мм}$ ($D_{\min} = 3 \text{ мм}$)

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						48
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Так як $f' = 8,5$ мм, тоді $S'_{f'} = 5,558$ мм

Аберації:

Для обрахування різноманітних абераційних показників та характеристик, як використав програмне забезпечення «Aber» і маю наступний результат:

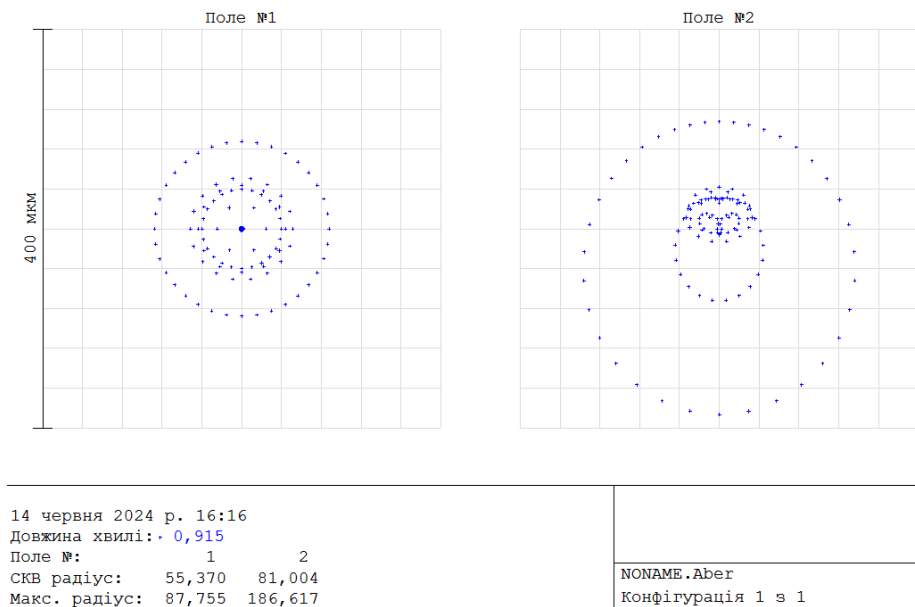


Рис. 3.5. Точкова діаграма аберації

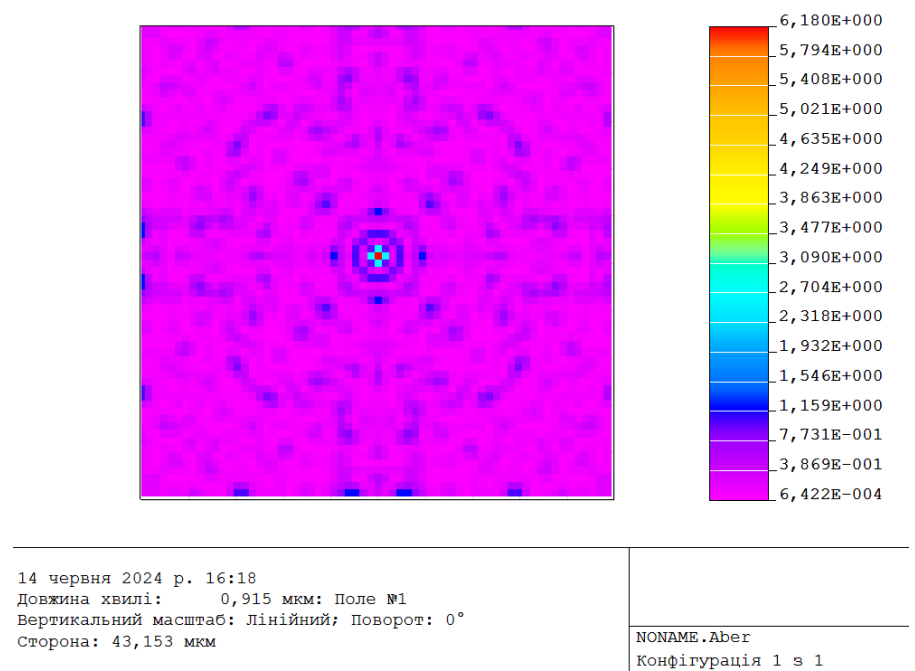
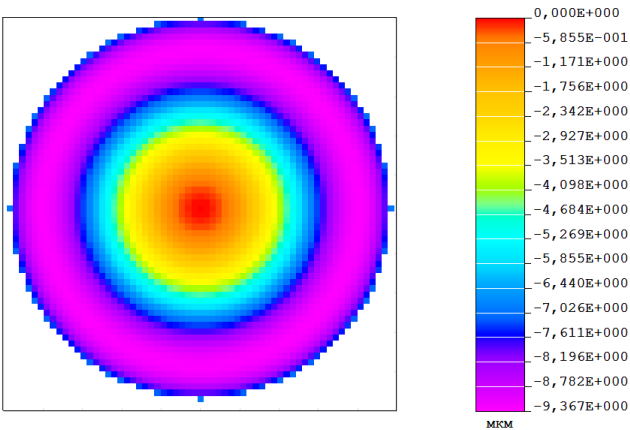
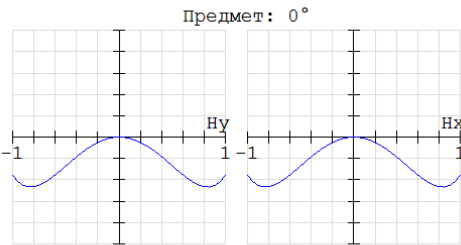


Рис. 3.6. Поверхня дифракційної ФРТ



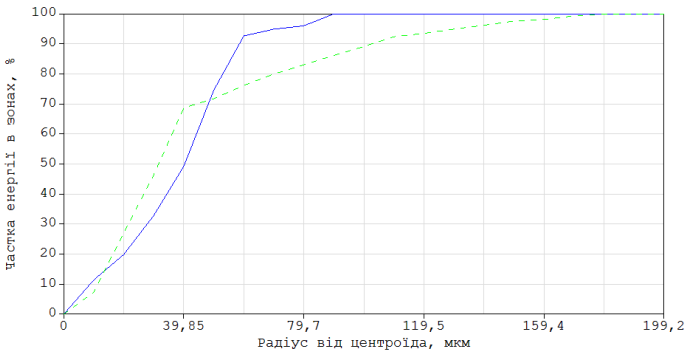
14 червня 2024 р. 16:17 Довжина хвилі: 0,915 мкм; Поле №1 Перепад = 9,367 λ, СКВ = 2,632 λ Поверхня: Зображення Діаметр вихідної зіниці: 7,6517 мм	NONAME.Aber Конфігурація 1 з 1
--	-----------------------------------

Рис. 3.7. Деформація хвильового фронту



14 червня 2024 р. 16:15
Довжина хвилі: 0,915
Максимальний масштаб: ±20 мкм
Макс. аберация: 11,27 мкм

Рис. 3.8. Хвильова аберация



14 червня 2024 р. 16:19 Поля зору: №1 №2 Довжина хвилі: 0,915 мкм Тип: Енергія в кругових зонах	NONAME.Aber Конфігурація 1 з 1
--	-----------------------------------

Рис. 3.9. Геометрична функція концентрації енергії

Як можна помітити, аберації з зазначеними вище характеристиками лінзи доволі великі, але важливо пам'ятати, що головна задача системи полягає у реєстрації відбитого лазерного променя та його напрямку. Подібні показники були б фатальними для систем, у яких дуже велику роль грає передача зображення, але для моєї системи подібне не має стати значною проблемою. Тим не менш, подібні аберації – це одна з причин, з якою система не наводиться по першим декільком зібраним лазерам та обрахованій інформації з них, адже, як ні як, головна задумка системи полягає у тому, аби значно збільшити відсоток влучань снарядів, які носять дрони.

3.2. Загальні енергетичні розрахунки.

3.2.1. Потужність лазера.

Енергетичні розрахунки в більшості включають у себе прорахування деталям роботи лазера, а саме:

- Потужність лазера P (Вт)
- Ефективність передачі η
- Необхідний енергетичний запас для забезпечення роботи на відстані 30 м

Для початку я розрахую необхідну потужність лазера для роботи на відстані 30 м, враховуючи, що типова ефективність лазерних діодів в цьому діапазоні становить 20-30%, тому для подальшого розрахунку я буду брати 25% як середнє значення зазначеного діапазону.

Розрахунок потужності лазера

Враховуючи діаметр та фокусну відстань, можемо використати наступну формулу для обчислення інтенсивності освітлення:

$$I = \frac{P}{A} \quad (3.2.1)$$

де P – потужність лазера;

A – площа освітленої поверхні.

Для площі освітленої поверхні на відстані 30 м (враховуючи кутове поле зору):

$$A = \pi(R * \tan(\theta))^2 \quad (3.2.2)$$

де R – відстань до об'єкта (30 м);

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						51
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

θ - кутове поле зору (60 градусів).

Тоді маю наступне:

$$A = 3.14 (30 * \tan(60^\circ))^2 = 8478 \text{ м}^2.$$

Розрахунки показують, що площа освітленої поверхні на відстані 30 м при кутовому полі зору 60 градусів становить приблизно 8478 м². При потужності лазера 1 Вт інтенсивність освітлення буде складати приблизно $0,000118 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

Для забезпечення достатньої інтенсивності освітлення на такій площі потрібна більша потужність лазера. Тому тепер визначаю необхідну потужність для типової ефективності лазерних діодів (20-30%) для забезпечення адекватного освітлення на відстані 30 м.

Загальна потужність лазера $P_{\text{л}}$ повинна враховувати коефіцієнт ефективності $\eta = 0,25$:

Для вихідної потужності освітлення в межах $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ та ефективності $\eta = 0,25$, виражаю P із формули 3.2.1:

$$P_{\text{л}} = \frac{1}{0,25} = 4 \text{ Вт}$$

Таким чином, для забезпечення достатньої інтенсивності освітлення потрібна потужність лазера близько 4 Вт.

3.2.2. Загальне живлення системи.

Для електроніки управління та обробки сигналів візьму середні значення споживання для сучасних компонентів:

- Мікроконтролер: 0.5 Вт
- Система обробки сигналів: 1 Вт
- Додаткові компоненти (інтерфейси, комунікація): 0.5 Вт

Загальне споживання електронікою можна знайти додавши ці показники для зазначених компонентів:

$$P_{\text{ел}} = P_{\text{мк}} + P_{\text{сист}} + P_{\text{дкомп}} \quad (3.2.3)$$

В такому випадку маю наступне:

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						52
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\text{ел}} = 0,5 + 1 + 0,5 = 2 \text{ Вт.}$$

Загальна потужність системи включає потужність лазера та електроніки:

$$P_{\text{з}} = P_{\text{л}} + P_{\text{ел}} \quad (3.2.4)$$

де $P_{\text{л}}$ – це прорахована потужність лазера;

$P_{\text{ел}}$ – це потужність яка необхідна для живлення системи.

З урахуванням додаткових втрат та резерву, вважаю за необхідне додати 20% до загальної потужності:

$$P_{\text{зр}} = 1,2 * (P_{\text{л}} + P_{\text{ел}}) = 1,2 * (4 + 2) = 7,2 \text{ Вт} \quad (3.2.5)$$

Враховуючи отриману потужність, можна припустити, що тепловиділення системи складатиме ті ж самі 7,2 Вт.

Вважаючи, що загальна потужність тепловиділення складає 7.2 Вт, що потребує ефективного відведення тепла. Для вибору системи охолодження ми можемо розглянути наступні варіанти:

Пасивне охолодження:

- Використання радіаторів з тепловою потужністю відведення 7.2 Вт.
- Використання матеріалів з високою теплопровідністю (алюміній, мідь).

Активне охолодження:

- Використання вентиляторів або мікро-вентиляторів для покращення відведення тепла.
- Забезпечення вентиляції всередині корпусу.

Зважаючи на загальну теплову потужність 7.2 Вт, пасивне охолодження може бути достатнім, за умови використання ефективного радіатора. Однак, якщо корпус має обмежену площу для радіатора або працює в умовах підвищеної температури, активне охолодження може бути необхідним.

Для забезпечення роботи системи необхідно вибрати джерело живлення, яке зможе забезпечити потужність 7.2 Вт з урахуванням резерву. Це може бути:

- Акумулятор з відповідною ємністю і потужністю.
- Зовнішній блок живлення (адаптер).

Розрахунок ємності акумулятора

Припустимо, що система працює від акумулятора і повинна забезпечити автономну роботу протягом 1 години і невеликим акумулятором із напругою 12 (В):

$$\text{Ємність} = \frac{P_{\text{зр}} * t}{U_{\text{ак}}} \quad (3.2.6)$$

де t – це приблизний час автономної роботи;

$U_{\text{ак}}$ – це напруга акумулятора;

$P_{\text{зр}}$ – це загальна потужність системи із резервом.

Підставивши значення у формулу маю наступний результат:

$$\text{Ємність} = \frac{7,2 * 1}{12} = 0,6 \text{ А * год}$$

З цього результату можна стверджувати, що для коректної роботи всіх електронних компонентів системи необхідно включати у конструкції акумулятор з ємністю не менше 0,6 (А * год) при напрузі 12 (В), або зовнішній блок живлення

3.3.3. Потік-сигнал, який потрапляє у ОС.

Для розрахунку потоку випромінювання, яке потрапляє у оптичну систему після відбиття від об'єкта, можна скористатися формулою для Ламбертового випромінювача, адже об'єкт, при попаданні лазера на нього, перетворюється на вторинний ламбертовий випромінювач. Ламбертове відбивання означає, що випромінювання рівномірно розподіляється по всіх напрямках від поверхні об'єкта.

1. Потік випромінювання від об'єкта:

Коефіцієнт відбивання ρ використовується для визначення відбитої потужності:

$$P_r = P_{\text{л}} * \rho \quad (3.2.7)$$

де P_r – відбита потужність;

$P_{\text{л}}$ – потужність лазера;

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						54
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

ρ – коефіцієнт відбиття.

2. Інтенсивність відбитого випромінювання:

Відбита потужність P_r розподіляється рівномірно по всій сфері радіусом $R = 30$ м. Знайти інтенсивність відбитого випромінювання можна за наступною формулою:

$$I_r = \frac{P_r}{4\pi R^2} \quad (3.2.8)$$

де I_r – це інтенсивність відбитого випромінювання;

R – відстань між об'єктом та оптичною системою.

3. Потік випромінювання, що потрапляє у ОС:

Вхідний потік випромінювання, що потрапляє в ОС з діаметром D_{oc} на відстані R можна виразити за наступною формулою:

$$P_{oc} = I_r * A_{oc} \quad (3.2.9)$$

де A_{oc} – це площа поверхні вхідного отвору ОС.

Площу поверхні вхідного отвору ОС можна визначити за наступною формулою:

$$A_{oc} = \pi \left(\frac{D_{oc}}{2} \right)^2 \quad (3.2.10)$$

4. Фактичні кроки розрахунку:

Площа поверхні вхідного отвору ОС:

$$A_{oc} = 3,14 * \left(\frac{0,01}{2} \right)^2 = 3,14 * 0,000025 \approx 7,85 * 10^{-5} \text{ м}^2$$

Відбита потужність:

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						55
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_r = 4 * 0,5 = 2 \text{ Вт}$$

Інтенсивність відбитого випромінення:

$$I_r = \frac{2}{4 * 3,14 * 30^2} \approx 1,77 * 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Потік випромінення, що потрапляє на ОС:

$$P_{oc} = 1,77 * 10^{-4} * 7,85 * 10^{-5} = 13,89 \text{ нВт}$$

Розрахунок співвідношення Сигналу та Шуму:

Для розрахунку співвідношення сигнал/шум для цієї системи потрібно врахувати величину сигналу та шуму, які приймаються оптичною системою. Основним джерелом сигналу є потік випромінювання, що потрапляє в оптичну систему після відбиття від об'єкта. Для цього вже було розраховане значення потоку випромінювання. Щоб розрахувати шум, можна врахувати електронний шум, який може бути виміряний як шум в датчиках (наприклад, фотодіодах) та електронному сприймачі в цілому.

Зазвичай це співвідношення вимірюється у дБ і за наступною формулою:

$$SNR = 10 * \log_{10}\left(\frac{S}{N}\right) \quad (3.2.11)$$

де S – це сигнал;

N – це шум.

Так як за рівень сигналу буде прийматися потік випромінення $P_{oc} = 13,89 \text{ нВт}$, що потрапляє на ОС, а за шум приймається електронний $N = 1 \text{ нВт}$, маю наступне:

$$SNR = 10 * \log_{10}\left(\frac{13,89}{1}\right) = 11,43 \text{ дБ}$$

Даний показник співвідношення є достатньо високим і вказує на чудове прийняття чистого сигналу у ОС, однак не варто забувати, що окрім електричного шуму існує багато інших факторів, однак всі вони залежать від натурального та

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		56

антропогенного оточення та впливу на середовище, в якому повинна функціонувати система.

Висновки до Розділу 3.

У третьому розділі були проведені детальні габаритні та енергетичні розрахунки для активної оптико-електронної системи наведення з лазерною підсвіткою об'єкту. Зокрема, розглянуті параметри габаритів, потужності лазера, споживання електроніки та системи охолодження.

Було визначено, що для забезпечення максимальної робочої відстані 30 м при кутовому полі зору +/- 30 градусів і кількості каналів від 7 до 32 необхідно використовувати лазер потужністю 4 Вт. З урахуванням додаткових втрат і резерву, загальна потужність системи зростає до 7.2 Вт, що потребує ефективної системи охолодження для стабільної роботи. Також були проведені розрахунки потоку випромінювання, що потрапляє в оптичну систему при відбитті від об'єкта на відстані 30 м. Визначено, що потік випромінювання, який потрапляє в оптичну систему, становить приблизно 13,89 нВт.

На основі цих даних було розраховано співвідношення сигнал/шум. Відсутність значного шуму в системі призводить до дуже високого значення співвідношення, що свідчить про високу якість сигналу порівняно з шумом. Отримані результати забезпечують основу для подальшого проектування та оптимізації оптико-електронної системи наведення, враховуючи її габаритні, енергетичні та функціональні характеристики.

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						57
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. КОНСТРУКЦІЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ.

Загальна конструкція:

Активна оптико-електронна система наведення з лазерною підсвіткою об'єкта складається з наступних основних компонентів:

1. Лазерний діод
2. Оптична система
3. Детектори (фотодіоди або ПЗС-матриця)
4. Електроніка управління
5. Джерело живлення
6. Система охолодження

Опис компонентів:

1. Лазерний діод:

Тип: Напівпровідниковий лазерний діод.

Довжина хвилі: 960 нм.

Потужність: 4 Вт.

Приклад моделі: Osram SPL PL90_3

Особливості: [25]

- Оптична пікова потужність до 75 Вт
- Довжина хвилі лазера 915 нм
- Підходить для коротких лазерних імпульсів від 1 до 100 нс
- Лазерна технологія Nanostack, що включає 3 випромінювачі з епітаксійним укладанням
- Лазерна апертура 200 мкм на 10 мкм
- Економічно ефективний пластиковий корпус для великих об'ємів застосування

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						58
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 4.1. Фото-ілюстрація лазерного діода Osram SPL PL90_3 [25]

2. Оптична система:

Включає лінзи для колімації лазерного променя і направлення його на об'єкт.

Матеріал лінз: Скло з покриттям, яке мінімізує втрати в діапазоні 900-960 нм.

Приклад моделі лінзи: Thorlabs ACL25416U-A.

Особливості: [26]

- Асферичні конденсорні об'єктиви з більшою апертурою та вищою світлосилою, ніж сферичні об'єктиви
- 13 різних діаметрів від 10 до 75 мм
- Світлосила від 0,52 до 0,79
- Доступні без покриття або з AR-покриттям для 350 - 700 нм або 650 - 1050 нм
- Виготовлені з оптичного коронного скла B270 (380 - 2100 нм)

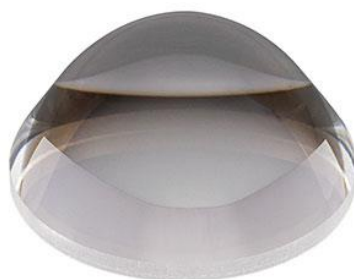


Рис. 4.2. Фото-ілюстрація лінзи для оптичної системи ACL25416U-A [26]

3. Детектори:

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						59
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тип: Фотодіоди з високою чутливістю або ПЗС-матриця.

Спектральний діапазон: 800-1000 нм.

Чутливість: Висока, для детектування низьких рівнів сигналу.

Приклад моделі фотодіода: Hamamatsu S1226-44BQ.

Особливості: [28]

- Низький темновий струм
- Висока надійність
- Висока чутливість (800-1000 нм)

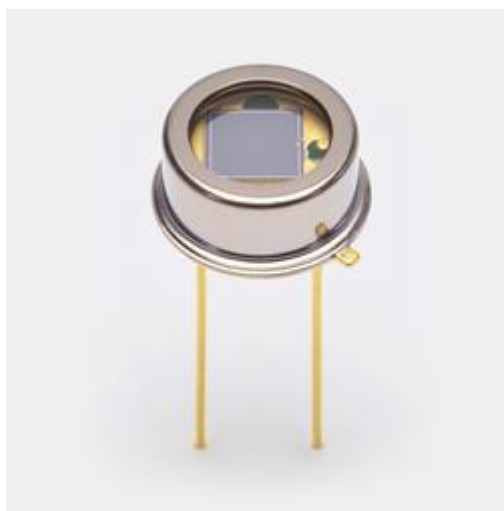


Рис. 4.3. Фото-ілюстрація фотодіода S1226-44BQ. [28]

4. Електроніка управління:

Основний компонент: Мікроконтролер для управління лазером і обробки сигналів від детекторів.

Приклад моделі мікроконтролера: STM32F303 series

Додаткові компоненти: драйвери для лазера, аналого-цифрові перетворювачі (ADC) для обробки сигналів від детекторів.

Особливості: [27]

- До 7 швидких і надшвидких компараторів (25 нс)
- До 4 операційних підсилювачів з програмованим коефіцієнтом підсилення

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						60
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

- До 2 12-бітних ЦАПів
- До 4 надшвидких 12-бітних АЦП з 5 MSPS
- До 3 швидких 144-мегагерцових таймерів керування двигуном (роздільна здатність < 7 нс)
- Повношвидкісні комунікаційні інтерфейси USB і CAN 2.0B
- Core Coupled Memory SRAM (Routine Booster), спеціальна архітектура пам'яті, що прискорює виконання критично важливих за часом підпрограм, збільшуючи продуктивність на 43% порівняно з флеш-пам'яттю.

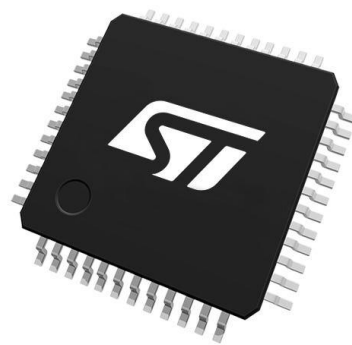


Рис. 4.4. Фото-ілюстрація мікроконтролера серії STM32F303. [27]

5. Джерело живлення:

Забезпечує стабільну напругу для лазера, електроніки управління та детекторів

Приклад моделі: Mean Well EPS-15-12

Особливості: [30]

- Універсальний вхід змінного струму / повний діапазон
- Захист від короткого замикання та перенавантаження
- Охолодження за рахунок вільної конвекції повітря
- Компактний розмір
- Споживання без навантаження (0.3 Вт)
- Робоча висота до 3000 м

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						61
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 4.6. Фото-ілюстрація блоку живлення відкритого типу EPS-15-12. [30]

6. Системи охолодження:

Пасивне охолодження: Радіатор з високою теплопровідністю.

Активне охолодження: Мікро-вентилятор при необхідності.

Приклад моделі радіатора: Wakefield-Vette 126605.

Особливості радіатора: [31]

- Матеріал: Мідь
- Структура гніту: Порошкова спечена мідь
- Невелика вага і компактний розмір
- Універсальний з високими тепловими характеристиками



Рис. 4.7. Фото-ілюстрація радіатора Wakefield-Vette 126605 [31]

Спрощений принцип роботи:

Лазерний діод генерує лазерний промінь довжиною хвилі 960 нм з потужністю 4 Вт. Промінь проходить через **оптичну систему**, яка колімує і направляє його на об'єкт.

Об'єкт, при потраплянні на нього лазера, стає вторинним ламбертовим випромінювачем. Відбитий промінь рівномірно розподіляється у всіх напрямках.

Відбитий промінь потрапляє на **детектори** (фотодіоди або ПЗС-матриця), розташовані в оптичній системі діаметром 10 мм. Вхідний потік випромінювання на детектори становить 13.89 нВт.

Сигнали з детекторів передаються до **системи обробки сигналів**, де вони підсилюються, фільтруються та перетворюються на цифрові сигнали за допомогою ADC.

Мікроконтролер обробляє цифрові сигнали, сигнали із 3D акселерометра та гіроскопа і забезпечує обробку та аналіз даних.

Вся система живиться від **джерела живлення**, яке забезпечує стабільну напругу для всіх компонентів.

Система охолодження підтримує оптимальну робочу температуру лазера та електроніки, забезпечуючи стабільну роботу системи.

Опис процесу роботи програми МК:

1. Ініціалізація системи

Етап «**Ініціалізації периферійних пристроїв**» підготовлює всі периферійні модулі до роботи. Це включає конфігурацію всіх необхідних портів вводу/виводу. Далі етап «**Ініціалізація системи**» запускає основні параметри і налаштування системи. Після чого етап «**Ініціалізація АЦП**» підготовлює аналогово-цифровий перетворювач для зчитування сигналів.

2. Конфігурація таймерів та інтерфейсів

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						63
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Етап «**Конфігурація таймерів та інтерфейсів**» налаштовує таймери для періодичних завдань та інтерфейсів для зв'язку з периферійними пристроями.

3. Конфігурація фотодіодів

Етап «**Конфігурація фотодіодів**» налаштовує фотодіодів для зчитування світлових сигналів.

4. Зчитування сигналів з фотодетекторів

Етап «**Зчитування сигналів з фотодетекторів**» зчитує аналогові сигнали від фотодетекторів.

5. Фільтрація та підсилення сигналів

Етап «**Фільтрація та підсилення сигналів**» застосує фільтри для видалення шуму і підсилення корисних сигналів.

6. Зчитування сигналів з АЦП

Етап «**Зчитування сигналів з АЦП**» оцифровує аналогові сигнали, зчитані з фотодетекторів.

7. Аналіз отриманих даних

Етап «**Аналіз отриманих даних**» обробляє оцифровані дані для визначення наявності цілі та даних по траєкторії падіння на ціль.

8. Обробка даних для визначення положення системи

Етап «**Обробка даних для визначення положення системи**» використовує оброблені дані для визначення поточного положення та орієнтації системи.

9. Зчитування даних з 3D акселерометра і гіроскопа

Етап «**Зчитування даних з 3D акселерометра і гіроскопа**» отримує дані з інерційних датчиків для оцінки положення і руху.

10. Розрахунок зібраних середніх значень

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						64
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

Етап «**Розрахунок зібраних середніх значень**» обчислює середні значення для підвищення точності даних.

11. Зчитування стану оптопар (ОП)

Етап «**Зчитування стану ОП**» визначає стан оптопар і їх готовність до роботи.

12. Налаштування ОП

Етап «**Налаштування ОП**» регулює параметри оптопар для оптимальної роботи (за можливості та необхідності).

13. Обробка сигналів з ОП

Етап «**Обробка сигналів з ОП**» аналіз сигналів, зчитаних з оптопар, для визначення наявності об'єктів або перешкод.

14. Оновлення коефіцієнтів підсилення ОП

Етап «**Оновлення коефіцієнтів підсилення ОП**» регулює підсилення оптопар для точнішого виявлення об'єктів.

15. Подача сигналів для виявлення реактивних міні-двигунів

Етап «**Подача сигналів для виявлення реактивних міні-двигунів**» відправляє відповідні сигнали для активації або регулювання міні-двигунів, якщо такі є у системі через активацію запалів оптопарами завдяки супер-конденсатору.

Висновки до Розділу 4.

Ця детально розроблена конструкція активної оптико-електронної системи наведення з лазерною підсвіткою об'єкта дозволяє забезпечити високу точність наведення та детектування об'єктів на відстані до 30 м. Використання високочутливих фотодіодів і сучасного мікроконтролера гарантує ефективну обробку сигналів, а система охолодження забезпечує стабільну роботу всіх компонентів.

У цьому розділі було наведено приклади моделей, які підходять для використання при повноцінному конструюванні, були наведені їх ключові особливості, якими пояснюється вибір саме них.

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						65
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Photonics Rules of Thumb: Optics, Electro-Optics, Fiber Optics, and Lasers, 2nd Edition <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071385190>
2. John Kerr and his effects found in 1877 and 1878
<https://www.pwein.at/physics/Lectures/Famous-Papers/PML-2008.pdf>
3. Abhandlungen der königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen (English translation) <https://search.worldcat.org/title/55796322>
4. MBDA ASRAAM (AIM-132)
<https://web.archive.org/web/20110502154501/http://typhoon.starstreak.net/common/AA/asraam.html>
5. Sampling and clustering algorithm for determining the number of clusters based on the rosette pattern <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-51/issue-1/017204/Sampling-and-clustering-algorithm-for-determining-the-number-of-clusters/10.1117/1.OE.51.1.017204.short>
6. Uncooled Infrared Microbolometer Arrays and their Characterisation Techniques
https://www.researchgate.net/publication/202301267_Uncooled_Infrared_Microbolometer_Arrays_and_their_Characterisation_Techniques
7. Electromagnetic Waves
<https://web.archive.org/web/20150504114023/http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/em.htm>
8. ІНФРАЧЕРВОНЕ ПРОМІННЯ
https://leksika.com.ua/17070812/ure/infrachervone_prominnya
9. Integration of IDCA coolers
https://web.archive.org/web/20161107155548/http://www.thales-cryogenics.com/wp-content/uploads/2014/01/replacement_idca_may2011.pdf
10. Novel template matching method with sub-pixel accuracy based on correlation and Fourier-Mellin transform https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-48/issue-05/057001/Novel-template-matching-method-with-sub-pixel-accuracy-based-on/10.1117/1.3125425.full#_
11. AUTOPILOT AND GUIDANCE FOR ANTI-TANK IMAGING INFRARED

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						66
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

GUIDED MISSILES

<https://web.archive.org/web/20161117144751/https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12610111/index.pdf>

12. Adaptive Correlation Tracking of Targets With Changing Scale

https://web.archive.org/web/20161110111346/http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1233&context=cis_reports

13. Д.В. Сивухін загальний курс фізики Т.IV оптика <https://kzf.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/09/sivuhin4.pdf>

14. Method and system of optical guidance of mobile body

<https://patents.google.com/patent/US6629028B2/en>

15. THE VULNERABILITY OF LASER WARNING SYSTEMS AGAINST GUIDED WEAPONS BASED ON LOW POWER LASERS

https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/1047/thesis_v1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

16. System design of a pulsed laser rangefinder https://pages.charlotte.edu/glenn-boreman/wp-content/uploads/sites/146/2014/06/Burns_OE_30_1991.pdf

17. Стугна-П повна інформація

https://www.ngu.com.ua/weapon/antitank/at_stugnap_all.html

18. MSPO 2023: Luch Design Bureau confirms use of Skif-M by Ukrainian forces

<https://www.janes.com/defence-news/news-detail/mspo-2023-luch-design-bureau-confirms-use-of-skif-m-by-ukrainian-forces>

19. Official US Army history of

TOW <https://web.archive.org/web/20150703021005/http://history.redstone.army.il/miss-tow.html>

20. Photodiode Basics: Selection & Operation

<https://www.teamwavelength.com/download/applicationtechnotes/an-ld17.pdf>

21. Positively birefringent material

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Positively_birefringent_material.svg

22. Visible light communication

https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_light_communication

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
						67
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. How to setup an IR remote and receiver on an Arduino

https://www.circuitbasics.com/arduino-ir-remote-receiver-tutorial/#google_vignette

24. Desing Tips for Photodiode Amplifiers <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/design-tips-for-photodiode-amplifiers/>

25. SPL PL90_3 AMS OSRAM <https://www.tme.eu/ua/details/splpl90-3/diodi-lazerni/ams-osram/spl-pl90-3/>

26. ACL25416U-A - Aspheric Condenser Lens

https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3835&pn=ACL25416U-A

27. STM32F303 series <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f303.html>

28. Si Photodiode S1226-44BQ

https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s1226_series_kspd1034e.pdf

29. OPA657

https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa657.pdf?ts=1717790866702&ref_url=https%2F%2Fwww.ti.com%2Fproduct%2FOPA657

30. EPS-15 series <https://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/EPS-15/EPS-15-spec.pdf>

31. Heat pipe Selection guideline

https://wakefieldthermal.com/content/data_sheets/wfv-heatpipe_designguide_R3_2020.pdf

					П001.00008.000 ПЗ	Лист.
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		68