

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

«На правах рукопису» УДК
004.932.2

До захисту допущено:
 Завідувач кафедри

_____ Н.І.Бурау
 (підпис) (ініціали,
 прізвище)
 «» _____ 2024 р.

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем
Магістерська дисертація
на здобування ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
системи та технології в приладобудуванні»
зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему: «Когерентний оптичний процесор для обробки тепловізійних
зображень»

Виконав:

студент II курсу, групи ПО-21мн

Кожушко Богдан Олександрович _____

Науковий керівник:

д. т. н., професор,

Колобродов Валентин Георгійович _____

Рецензенти:

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

Студент : _____

Київ – 2024

Зміст

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	11
ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	11
1.1. Оптична обробка та фільтрація інформації	11
1.2. Когерентний оптичний процесор	13
1.3. Тепловізійні системи у військовому використанні	15
1.4 Сучасні методи обробки тепловізійних зображень	17
1.5 Огляд існуючих когерентних процесорів	20
1.6 Технічні характеристики сучасних когерентних оптичних процесорів	28
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНОГО ПРОЦЕСОРА.....	33
2.1. Основні характеристики оптичного процесора	33
2.2. Цифровий когерентний оптичний спектроаналізатор.....	38
Висновок.....	47
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ КОГЕРЕНТНИХ ОПТИЧНИХ СПЕКТРОАНАЛІЗАТОРІВ.....	48
3.1. Принципи роботи та теоретичні основи когерентних оптичних спектроаналізаторів	48
3.2. Калібрування та точність вимірювань когерентних оптичних спектроаналізаторів	53
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОГЕРЕНТНИХ ОПТИЧНИХ СПЕКТРОАНАЛІЗАТОРІВ	59
4.1 Схема стенду КОС	59
4.3 Вимірювання розподілу інтенсивності світла у дифракційній картині, яка сформована тест-об'єктом	63
4.4 Визначення відповідності положень дифракційних максимумів у площині спектрального аналізу їх просторовій частоті.....	66
4.5 Вимірювання просторових спектрів тест-об'єктів, отриманих з використання двох лазерів з різними довжинами хвиль	67
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація комп'ютерно-інтегрованих технологій»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри

 Н. І. БУРАУ
 «__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студента
 Кожушка Богдана Олександровича

1. Тема дисертації « **Когерентний оптичний процесор для обробки тепловізійних зображень** », науковий керівник дисертації Колобродов Валентин Георгійович, д.т.н., професор затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації «15» червня 2024 р.
3. Об'єкт дослідження: можливість використання мікроболометричних матриць в системах самонаведення.
4. Предмет дослідження: оптико-електронна система з мікроболометричною матрицею.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 5.1 Аналіз тепловізійних систем самонаведення.
 - 5.2 Порівняння звичайних та матричних фотоприймальних пристроїв в тепловізійних системах.
 - 5.3 Розробка фізико-математичної моделі оптичної системи з мікроболометричною матрицею.
 - 5.5 Розробка моделі оптичної головки самонаведення з мікроболометричною матрицею.
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація в програмі PowerPoint
7. Орієнтовний перелік публікацій: наукова стаття у збірнику праць науково-практичної конференції
8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 31.10.2022 р

Календарний план

№ З№ зз/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1 1	Інформаційний пошук по тематиці когерентний оптичний процесор для обробки тепловізійних зображень	16.04.24 р.	
22	Огляд принципу роботи мікроболометричної матриці та створення фізико-математичної моделі.	25.04.24 р.	
3 3	Огляд та аналіз існуючих мікроболометричних матриць	12.05.24 р.	
4 4	Розрахунок основних характеристик приладу	22.05.24 р.	
5 5	Розробка моделі головки самонаведення ПЗРК з мікроболометричною матрицею.	03.06.24 р.	
66	Оформлення магістерської дисертації та презентації	10.06.24 р.	

Студент
Кожушко Б.О.

Науковий керівник дисертації

Колобродов В.Г.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ООІ – оптична обробка інформації

КОС – когерентна оптична система

SBP – Space Bandwidth Product

ОЕС - оптико-електронні системи

ТПСС - тепловізійні системи спостереження

ТВСС - телевізійні системи спостереження

ЕОП – електронно-оптичний перетворювач

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: ст. 76, рис. 15, табл. 10, джерел 35.

КОГЕРЕНТНИЙ ОПТИЧНИЙ ПРОЦЕСОР ДЛЯ ОБРОБКИ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Задачею даної дисертації було створення автоматизованої когерентної оптико-електронної системи для обробки тепловізійних зображень з метою покращення якості візуалізації та ефективності аналізу теплових даних в різних умовах. Актуальність розробки даної системи підкреслюється зростаючою потребою у вдосконаленні інструментів для обробки тепловізійних даних, що широко використовуються в сучасних військових, промислових та наукових додатках.

Ретельний аналіз існуючих класичних і сучасних прототипів систем для обробки тепловізійних зображень виявив їх переваги та слабкі сторони. Сучасні системи зазвичай використовують цифрову обробку сигналів, що має свої обмеження в частині швидкості та точності обробки зображень в реальному часі. Когерентні оптичні процесори, навпаки, здатні забезпечити високошвидкісну та високоточну обробку завдяки використанню властивостей когерентного світла.

На основі аналізу було сформульовано головну задачу дисертації: створення когерентного оптичного процесора для обробки тепловізійних зображень, що забезпечує високу якість зображень, швидкість обробки та надійність функціонування в різних умовах, включаючи денні та нічні операції. Основними вимогами до системи були можливість реального часу обробки, дистанційна передача відеоінформації та зручність експлуатації.

ABSTRACT

Explanatory note: p. 76, fig. 15, Table 10, 35 references.

COHERENT OPTICAL PROCESSOR FOR THERMAL IMAGING PROCESSING

The objective of this thesis was to create an automated coherent optoelectronic system for processing thermal images in order to improve the quality of visualization and efficiency of thermal data analysis in various conditions. The relevance of developing this system is emphasized by the growing need to improve tools for processing thermal imaging data, which are widely used in modern military, industrial and scientific applications.

A thorough analysis of the existing classical and modern prototypes of thermal imaging systems revealed their advantages and weaknesses. Modern systems usually use digital signal processing, which has its limitations in terms of speed and accuracy of real-time image processing. Coherent optical processors, on the other hand, are able to provide high-speed and high-precision processing by exploiting the properties of coherent light.

Based on the analysis, the main objective of the thesis was formulated: to create a coherent optical processor for thermal imaging processing that provides high image quality, processing speed, and reliability of operation in various conditions, including day and night operations. The main requirements for the system were the possibility of real-time processing, remote transmission of video information, and ease of use.

ВСТУП

Сучасна людина живе в епоху, яка визначається невичинним прагненням до технологічних інновацій, необхідність швидкого вирішення проблем у різних сферах життя стає все більш очевидною. Серед поточних проблем обробка тепловізійних зображень виділяється як важлива сфера, яка потребує вдосконалених рішень і підходів.

Актуальність розробки когерентних оптичних процесорів для обробки тепловізійних зображень зумовлена кількома ключовими факторами. Перш за все, це зростаючий попит на ефективний і швидкий аналіз тепловізійних даних у різних секторах: від промислових інспекцій і моніторингу інфраструктури до медичної діагностики та оборонних застосувань, тепловізори відіграють ключову роль в оцінці енергоефективності та забезпеченні безпеки. Однак, оскільки обсяг і складність тепловізійних даних продовжує зростати, звичайні методи обробки не встигають за ними. Це створює нагальну потребу в інноваційних технологіях, здатних швидко й точно вирішувати масштабні завдання обробки теплових зображень. Крім того, обмеження, властиві традиційним електронним процесорам загострюють терміновість прийняття рішень. Електронні процесори стикаються з такими проблемами, як затримка, енергоспоживання та масштабованість, коли їм доводиться обробляти величезні обсяги даних, властиві програмам тепловізійної обробки. Навпаки, когерентні оптичні процесори пропонують переконливу альтернативу, використовуючи можливості паралельної обробки світлової інформації для досягнення безпрецедентного рівня ефективності обчислень.

Також актуальність впровадження когерентних оптичних процесорів для обробки тепловізійних зображень підкреслюється мінливим характером технологічних загроз і можливостей. Оскільки прогрес у сфері штучного інтелекту, машинного навчання та комп'ютерного зору продовжує змінювати ландшафт обробки зображень, потреба у додаткових апаратних рішеннях стає все більш очевидною. Когерентні оптичні процесори мають потенціал для підсилення цих

передових алгоритмів, забезпечуючи швидший відгук, розширене виділення ознак і більш надійне прийняття рішень під час аналізу тепловізійного зображення.

На додаток до вирішення нагальних проблем, терміновість впровадження когерентних оптичних процесорів для тепловізійної обробки зображень зумовлена необхідністю вдосконалення технологічної інфраструктури, що, за умов прискорення поширення датчиків, камер і пристроїв, оснащених можливостями тепловізійної обробки, задовольнятиме попит на масштабовані та ефективні рішення обробки інформації.

Підсумовуючи, актуальність впровадження когерентних оптичних процесорів для обробки теплових зображень є беззаперечною.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1. Оптична обробка та фільтрація інформації

Оптична обробка інформації (ООІ) використовує принципи оптики для обробки даних. ООІ пропонує значні переваги перед традиційними електронними методами, зокрема щодо паралельності та швидкості. Це пов'язано з тим, що світлове поле має параметри, які змінюються, як у часі, так і просторі, тобто є багатовимірним сигналом, а отже має більшу інформативність, на відміну від електричного поля, яке є в свою чергу є одномірним сигналом. Багатовимірність дозволяє обробляти сигнали у багатьох каналах одночасно, тобто отримуємо переваги щодо паралельності. Також світлове поле має вищу частоту за електричні сигнали, що дозволяє збільшити швидкодію системи обробки. Оптичні системи можуть обробляти величезні обсяги даних одночасно, що робить їх добре придатними тоді, коли потрібні високошвидкісні обчислення і обробки в реальному часі. Цю галузь можна розділити на некогерентні та когерентні оптичні системи обробки інформації, кожна з яких має різні характеристики та застосування.

Некогерентні оптичні системи обробки інформації використовують джерела світла, такі як світлодіоди або лазери, без фазової когерентності. Це означає, що світлові хвилі не синхронізовані по фазі, що призводить до втрати можливості інтерферувати хвилям між собою. Незважаючи на це, некогерентні системи є цінними в різних варіантах застосування завдяки своїй простоті та надійності. Вони зазвичай використовуються в системах обробки зображень, розпізнавання образів і оптичного розпізнавання символів.

Розглянемо схему пристрою некогерентної обробки сигналів, яка реалізує операції множення та інтегрування (рис.1.1.) . Нитка накалювання є некогерентним джерелом світла, система формування зображення обведена штриховою лінією,

фотодіод зображений справа. $f_1(x, y)$ – транспарант сигналу, який поміщений до вхідної площини P_1 оптичної системи, $f_2(x, y)$ сигнальний транспарант в площині P_2 .

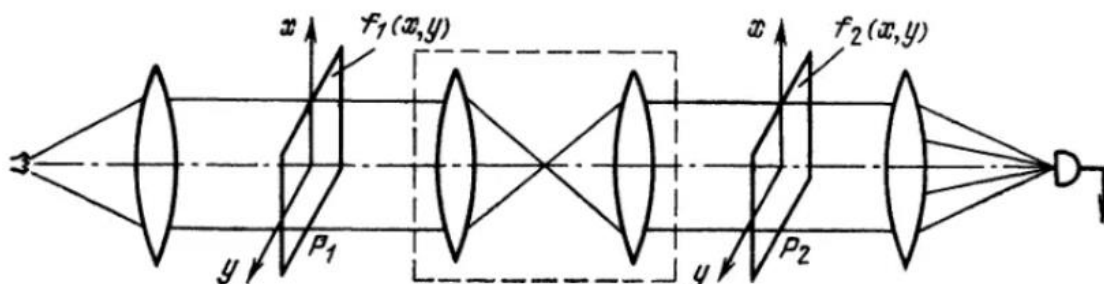


Рис.1.1. Схема пристрою некогерентної обробки сигналів

Некогерентні оптичні системи обробки інформації застосовуються в дистанційному зондуванні, розпізнаванні шаблонів і особливостей даних, оптичному розпізнаванні символів та ін.

Системи когерентної оптичної обробки інформації використовують джерела світла з високою фазовою когерентністю, наприклад лазери. Ця узгодженість дозволяє отримувати інтерференцію променів, які можна використовувати для різних передових технологій обробки. Когерентні системи пропонують чудову продуктивність щодо роздільної здатності, контрастності та здатності виконувати складні обчислення.

Такі когерентні системи використовуються в голографії, оптичних комп'ютерах, які виконують обчислення зі швидкістю світла, пропонуючи значні переваги у швидкості над електронними аналогами, обробці оптичних сигналів, включаючи фільтрацію, модуляцію та демодуляцію.

Розглянемо схему пристрою когерентної обробки сигналів (рис.1.2.) .

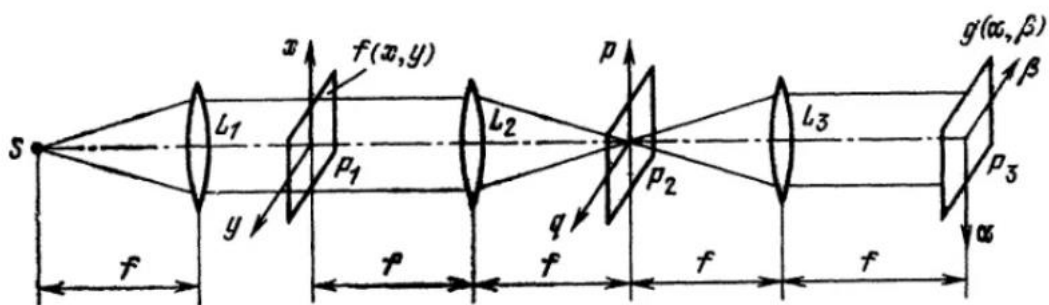


Рис.1.2. Схема пристрою когерентної оптичної обробки інформації

Монохроматичне точкове джерело S випромінювання поміщено перед колімуючою лінзою L_1 на фокусній відстані. Монохроматична плоска хвиля освітлює площину вхідного сигналу P_1 , оброблюваний сигнал $f(x, y)$ розміщений в площині P_1 , комплексне світлове поле $g(\alpha, \beta)$ розміщене у вихідній площині P_3 .

ООІ, як некогерентної, так і когерентної, пропонує низку переваг для сучасних технологій. Некогерентні системи забезпечують надійність і простоту, що робить їх придатними для різноманітних практичних застосувань. Навпаки, когерентні системи, і зокрема когерентні оптичні процесори, пропонують розширені можливості щодо швидкості, роздільної здатності та складності, що позиціонує їх на передньому краї передових обчислювальних технологій. Оскільки оптична обробка продовжує розвиватися, її вплив на такі сфери, як зображення, обчислення та обробка сигналів, безсумнівно, зростатиме, стимулюючи інновації та ефективність у багатьох галузях.

1.2. Когерентний оптичний процесор

Когерентний оптичний процесор — це пристрій, який використовує когерентне світло для виконання різноманітних задач по ООІ. Ці процесори використовують інтерференційні властивості когерентного світла для досягнення високошвидкісних операцій із високою роздільною здатністю.

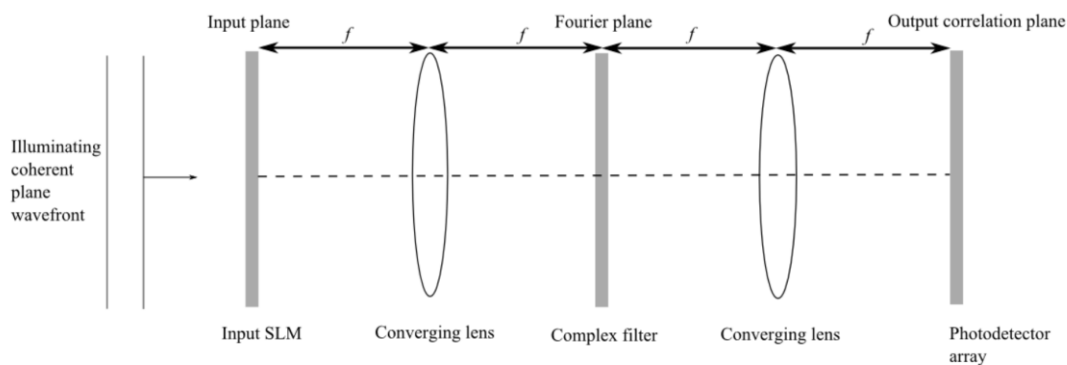
Figure 1. Canonical 4- f coherent optical processor

Рис.1.3. Когерентний оптичний процесор

Маніпулювання комплексною амплітудою фронту когерентної хвилі є основою методів когерентної оптичної обробки. Головним у цих методах є здатність збиральної лінзи формувати у своїй задній фокальній площині складне двовимірне перетворення Фур'є функції апертури, розміщеної в її передній фокальній площині. Крім того, запис комплексного поля області Фур'є через Голографічні методи несучої хвилі призвели до розробки когерентного оптичного процесора з двома лінзами з 4 фокусними відстанями, який схематично показано на рис.1.3. Добре відомо, що ця компоновка може бути використаний для реалізації двовимірної кореляції між еталонним об'єктом і вхідною сценою. Сигнал кореляції у вихідній площині потім вказує на присутність і розташування еталонного об'єкта у вхідній сцені.

Просторові модулятори світла модулюють амплітуду, фазу або поляризацію світлових хвиль, уможливаючи складні операції обробки.

Детектори фіксують оброблені світлові сигнали та перетворюють їх на електронні сигнали для подальшого аналізу.

Когерентні оптичні процесори можуть виконувати оптичні перетворення Фур'є, які є фундаментальними для багатьох завдань обробки сигналів. Ці процесори можуть покращувати, фільтрувати та аналізувати зображення з високою швидкістю та роздільною здатністю. Когерентні процесори здатні розпізнавати та обробляти складні шаблони в даних, що робить їх корисними в таких сферах, як біометрія та безпека.

Їхніми перевагами є, як було сказано раніше, паралелізм та швидкість: ці системи можуть обробляти кілька потоків даних одночасно, підвищуючи пропускну здатність і ефективність, вони працюють зі швидкістю світла, забезпечуючи неперевершену швидкість обробки. Висока роздільна здатність і контрастність когерентних систем забезпечують точну й точну обробку.

Просторова смуга пропускання SBP (Space Bandwidth Product), визначається числом роздільних точок, які здатний формувати спектроаналізатор. Ця смуга є аналогом робочого спектрального діапазону. Найбільша просторова частота $\nu_{x,max} = \nu_{res}$, яку розділяє КОС, визначається найбільшим кутом дифракції $\varphi_d = \theta_{max}$ ґратки, яка розташована в площині вхідного транспаранта. При нормальній падінні плоскої хвилі на дифракційну ґратку, яка розташована в передній фокальній площині фур'є-об'єктива, для першого порядку дифракції із основного рівняння ґратки маємо: $d \sin \varphi_{d1} = \lambda$, де $d = 1/\nu_{res}$ – період дифракційної ґратки. Звідки

$$\nu_{res} = \frac{1}{d} = \frac{1}{\lambda} \sin \theta_{max} . \quad (1.1)$$

Тоді просторова смуга пропускання спектроаналізатори дорівнює:

$$SBP = \frac{D_o}{d} = D_o \nu_{res} = \frac{D_o}{\lambda} \sin \varphi_{d1}, \quad (2.2)$$

де D_o – діаметр вхідного транспаранта.[10]

1.3. Тепловізійні системи у військовому використанні

Сучасні оптико-електронні системи(ОЕС) широко застосовують для пошуку, виявлення та розпізнавання об'єктів у просторі на граничній дальності, та вимірювання їх параметрів, таких як просторові координати, швидкість руху і розміри. До складу таких систем слід віднести, передусім, тепловізійні системи спостереження (ТПСС) та телевізійні системи спостереження (ТВСС).

В останні роки ТПСС отримали новий розвиток, який має революційний характер і пов'язаний зі створенням неохолоджуваних інфрачервоних (ІЧ) матричних приймачів випромінювання (МПВ). Слід також відзначити, що і ТВСС використовують сучасні МПВ на основі ПЗЗ-структур, які за пороговою чутливістю не поступаються приладам нічного бачення на електронно-оптичних

перетворювачах, але мають значно більший динамічний діапазон. Опитування окремих чутливих елементів МПВ з подальшою обробкою отриманих при цьому електричних сигналів називають «спостережним» режимом роботи, а самі системи – системами «спостережного» типу. [17]

На сьогоднішній день тепловізійні системи дуже поширені серед країн, які безпосередньо приймають участь у військових конфліктах. Тепловізор можна як вчепити на приціл так і на літак чи танк.

Тепловізійні детектори вловлюють інфрачервоне випромінювання, що випускається всіма об'єктами, температура яких перевищує абсолютний нуль. Температурні зміни захопленої сцени відображаються у вигляді термограми.

Тепловізійне зображення завдяки своїм різноманітним перевагам має велику кількість застосувань у військовій та оборонній сферах. Воно широко використовується армією і флотом для охорони кордонів і забезпечення правопорядку. Воно також використовується в системах запобігання зіткненням кораблів і наведення. В авіаційній промисловості він значно зменшив ризики польотів в умовах низької освітленості та вночі. Вони широко використовуються у військовій авіації для ідентифікації, локалізації та наведення на ворожі сили. Останнім часом вони також використовуються в цивільній авіації для моніторингу стану літаків.[7]

Основні переваги тепловізорів:

- Це пасивні пристрої, тому для освітлення місця не потрібне зовнішнє освітлення. Транспортний засіб, людину чи тварину можна розпізнати за випромінюванням, яке вона випускає.

- Важко виготовити камуфляж, який приховає транспортний засіб або людину від виявлення тепловізором. Зазвичай їх можна побачити як джерела тепла крізь будь-яку рослинність, окрім найгустішої.

- Дим і туман не послаблюють і не розсіюють теплове випромінювання так, як випромінювання видимого діапазону. Результатом цього є не тільки те, що об'єкти можна побачити крізь значний рівень диму або туману, але й те, що дальність, на

якій можна побачити об'єкти за нормальних атмосферних умов, значно збільшується.[8]



Рис. 1.4. Зловмисник, який ховається на темному горіщі.

1.4 Сучасні методи обробки тепловізійних зображень

Сучасні методи обробки тепловізійних зображень охоплюють широкий спектр прийомів і алгоритмів, спрямованих на підвищення якості, точності та ефективності аналізу тепловізійних зображень.

Підвищення якості тепловізійних зображень є важливим етапом обробки, оскільки початкові зображення можуть бути низької якості через шум, низький контраст або обмежену роздільну здатність.

Шум у теплових зображеннях може суттєво ускладнити аналіз. Для зменшення шуму використовуються різні фільтри, такі як медіанний фільтр, який зменшує вплив випадкових сплесків пікселів, або Гауссовий фільтр, який згладжує зображення, зберігаючи основні структури.

Методи покращення контрасту, такі як вирівнювання гістограми або адаптивне вирівнювання гістограми (CLAHE), використовуються для поліпшення видимості деталей на зображеннях. Вирівнювання гістограми перерозподіляє інтенсивності пікселів, щоб покращити контрастність, тоді як CLAHE локально адаптує контрастність, що особливо корисно для теплових зображень з нерівномірною освітленістю.

Сегментація дозволяє розділити зображення на значущі області, такі як окремі об'єкти або фони, що полегшує подальший аналіз.

Прості методи порогового значення використовують фіксовані або адаптивні порогові значення для відокремлення об'єктів від фону. Наприклад, глобальне порогове значення підходить для зображень з однорідною освітленістю, тоді як адаптивне порогове значення враховує локальні варіації інтенсивності.

Кластеризація, такі як алгоритм k-means, використовується для групування пікселів на основі їх інтенсивності або інших характеристик. Це дозволяє виявляти різні області на теплових зображеннях, які можуть відповідати різним матеріалам або температурами.

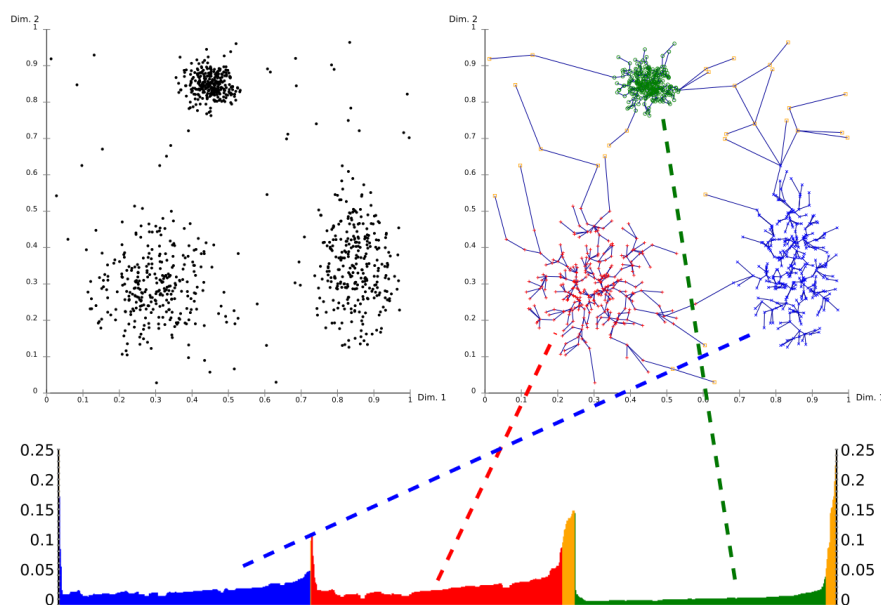


Рис.1.5 Кластеризація

Активні контури та методи рівня набору використовуються для точного визначення контурів об'єктів на зображеннях. Ці методи дозволяють динамічно оновлювати контури у відповідь на зміну даних, забезпечуючи високу точність сегментації.

Автоматичне розпізнавання та класифікація об'єктів є важливою задачею в аналізі тепловізійних зображень, що знаходить застосування у різних сферах, від військової справи до медицини.

Глибокі нейронні мережі (CNNs) здатні автоматично виділяти характерні ознаки зображень та класифікувати об'єкти з високою точністю. Ці методи

особливо ефективні для складних завдань, таких як розпізнавання об'єктів в умовах низької якості зображення.

Традиційні алгоритми машинного навчання, такі як SVM (Support Vector Machines) і Random Forest, також використовуються для класифікації об'єктів. Ці методи можуть бути менш вимогливими до обчислювальних ресурсів у порівнянні з глибокими нейронними мережами, але все ще забезпечують високу точність.

Реєстрація та злиття зображень дозволяють об'єднувати інформацію з різних джерел, що підвищує точність і повноту аналізу.

Вирівнювання тепловізійних зображень з іншими типами зображень, такими як оптичні або радіолокаційні, дозволяє комбінувати різні види даних. Це особливо корисно для медичних і військових застосувань, де важливо поєднувати теплову інформацію з іншими видами візуалізації.

Комбінація тепловізійних зображень з іншими джерелами даних (наприклад, мультиспектральними або гіперспектральними зображеннями) дозволяє покращити інформативність та точність аналізу. Це забезпечує більш повну картину для прийняття рішень у різних сферах.

Тепловізійні зображення забезпечують можливість *вимірювання і аналізу температурних профілів* об'єктів і сцен.

Точне вимірювання температури на різних ділянках зображення дозволяє виявляти перегрівання або охолодження об'єктів, що може бути критичним для промислових процесів або медичних діагнозів.

Аналіз температурних аномалій дозволяє ідентифікувати проблеми, такі як технічні несправності у промислових установках або структурні дефекти в будівлях. Це важливо для профілактичного обслуговування і безпеки.

Динамічний аналіз тепловізійних зображень передбачає вивчення змін температури та теплових характеристик об'єктів у часі. Вивчення змін температури на об'єктах у різні моменти часу дозволяє виявляти тренди і аномалії, що є важливим для моніторингу стану обладнання, структур та здоров'я пацієнтів.

Тривимірна реконструкція на основі тепловізійних зображень дозволяє створювати 3D моделі об'єктів і сцен. Використання тепловізійних зображень для

створення тривимірних моделей забезпечує додаткову інформацію про форму та об'єми об'єктів, що важливо для детального аналізу та планування.

Приклади використання

Сучасні методи обробки тепловізійних зображень знаходять широке застосування в різних сферах. Використання тепловізійних зображень для виявлення та розпізнавання цілей, навігації у нічний час, рятувальних операцій та моніторингу обстановки на полі бою. Тепловізори забезпечують можливість бачити у повній темряві та через дим або інші перешкоди. Тепловізійні зображення використовуються для діагностики захворювань, моніторингу стану пацієнтів та дослідження фізіологічних процесів. Наприклад, вони можуть допомогти виявити запальні процеси або судинні порушення за допомогою аналізу теплових профілів тіла. Тепловізійні зображення застосовуються для технічної діагностики обладнання, моніторингу промислових процесів та контролю якості продукції. Вони дозволяють виявляти проблеми, такі як перегрівання механізмів, витoki тепла або дефекти у виробі. Тепловізійні обстеження допомагають виявляти тепловтрати, дефекти в ізоляції, структурні проблеми та інші дефекти у будівлях та інженерних спорудах. Це дозволяє підвищити енергоефективність і безпеку будівель.

1.5 Огляд існуючих когерентних процесорів

Розглянемо деякі приклади реалізованих процесорів.

Когерентна оптична нейронна мережа MIT (MIT's Coherent Optical Neural Network)

Нещодавні успіхи в галузі глибоких нейронних мереж викликали значний інтерес до апаратних прискорювачів для покращення швидкості та енергоспоживання.

Тут представлено новий тип фотонного прискорювача на основі когерентного детектування, який масштабується до великих мереж і може працювати на високих (гігагерцових) швидкостях і дуже низьких (субаттоджоулевих) енергіях на множення і накопичення (MAC), використовуючи масивне просторове

мультиплексування, що забезпечується стандартними оптичними компонентами вільного простору. На відміну від попередніх підходів, ваги і входи оптично кодуються, щоб мережу можна було перепрограмувати і навчати «на льоту».

Симуляції мережі з використанням моделей для класифікації цифр і зображень виявляють «стандартну квантову межу» для оптичних нейронних мереж, встановлену шумом фотодетектора. Ця межа, яка може сягати 50 зДж/МАК, свідчить про те, що продуктивність нижче термодинамічної (Ландауєрової) межі для цифрових незворотних обчислень теоретично можлива в цьому пристрої.

Запропонований прискорювач може реалізовувати як повністю зв'язані, так і згорткові мережі. Ми також представляємо схему для зворотного розповсюдження і навчання, які можуть бути виконані в одному і тому ж апаратному забезпеченні. Така архітектура дозволить створити новий клас наднизькоенергетичних процесорів для глибокого навчання. [9]

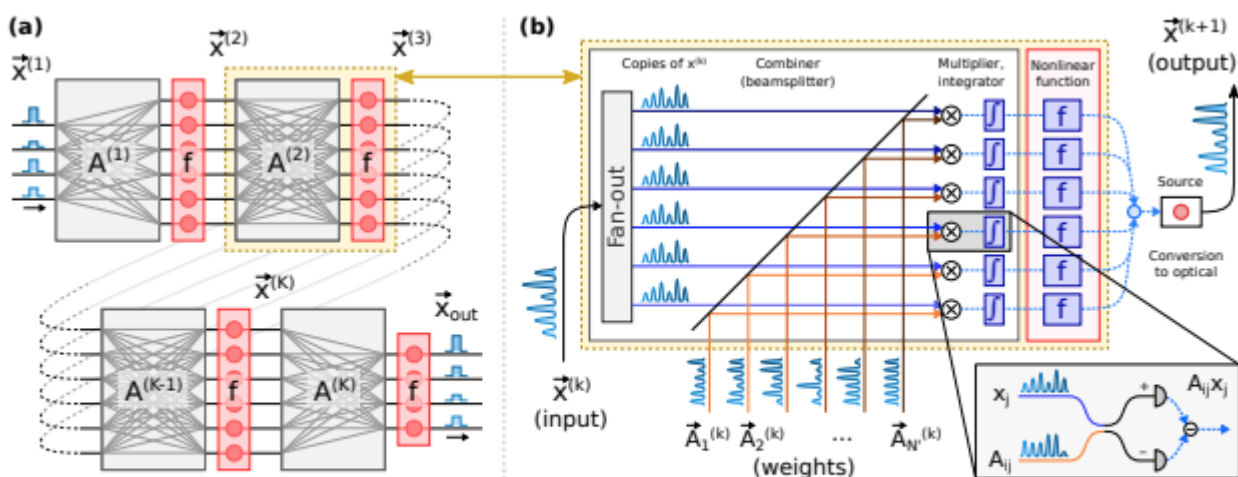


Fig. 1. (a) Schematic of a deep neural network with K layers. (b) Schematic of optical tensor core implementing a single layer. Data and weights are multiplied using homodyne detectors (inset).

Оптичний процесор Optalysys (Optalysys' Optical Processor:)

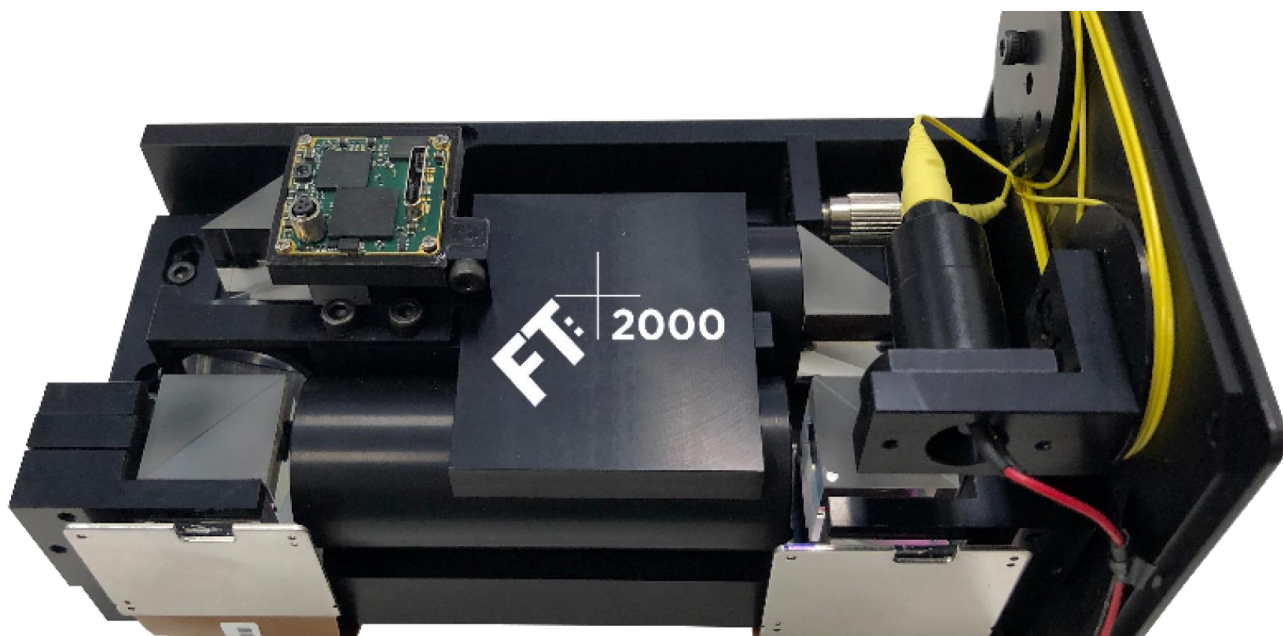
Optalysys - це компанія, яка розробляє технологію оптичних обчислень для різних застосувань, включаючи глибоке навчання, криптографію та геноміку. Їхній оптичний процесор - це новий підхід до обчислень, який використовує світлові хвилі замість традиційних електронних сигналів.

Ключова перевага оптичних процесорів полягає в їхньому потенціалі для надзвичайно високошвидкісної паралельної обробки, оскільки світло може

рухатися набагато швидше, ніж електрика через звичайні електронні схеми. Це робить їх особливо придатними для завдань, які передбачають великомасштабну обробку даних або складні математичні обчислення.

Оптичний процесор Optalysys працює за допомогою методу перетворення Фур'є, який розбиває складні математичні операції на простіші, розпаралелювані завдання, які можна виконувати одночасно, використовуючи світлові Аїні патерни. Цей підхід має потенціал для значного прискорення певних типів обчислень порівняно з традиційними електронними процесорами.

Однак варто зазначити, що хоча оптичні процесори є перспективними для певних застосувань, вони також стикаються зі значними технічними проблемами, такими як підтримання когерентності на великих відстанях та інтеграція з існуючими електронними системами. На момент мого останнього оновлення Optalysys та інші компанії в цій галузі продовжують працювати над вирішенням цих проблем і наближенням оптичних обчислень до практичного використання.



Ключові характеристики процесора Optalysys:

1. Оптична обробка даних дозволяє досягати надвисокої швидкості обчислень. Перетворення даних в оптичному середовищі відбувається майже миттєво, що значно підвищує продуктивність у порівнянні з традиційними електронними процесорами.

2. Чиплет Etile споживає набагато менше енергії і генерує менше тепла, ніж традиційні електронні еквіваленти. Це робить його ідеальним для застосування у великих обчислювальних центрах та наукових дослідженнях, де енергоефективність має критичне значення.

3. Декілька фотонних обчислювальних етапів можуть бути розміщені на одному чипі, що дозволяє масштабувати обчислення за необхідності. Це забезпечує гнучкість для виконання великомасштабних обчислювальних завдань.

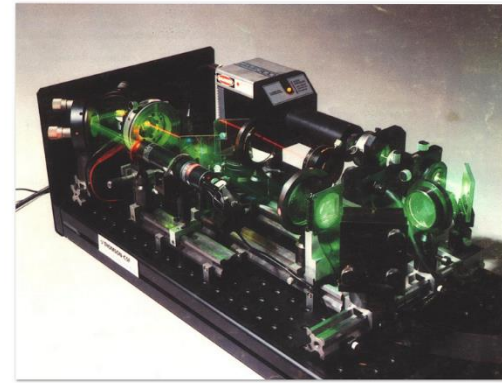
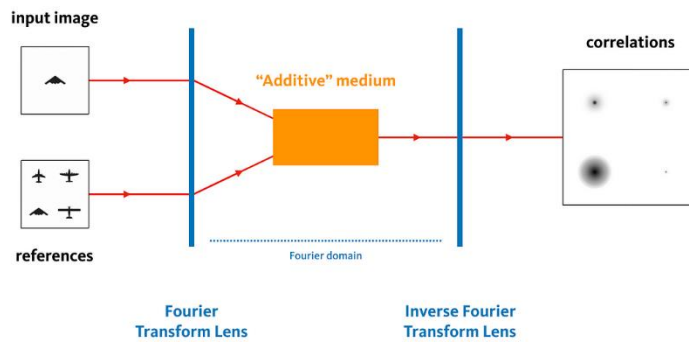
4. Etile має стандартний інтерфейс PCIe, що дозволяє легко інтегрувати його з існуючими апаратними засобами. Це знижує бар'єри для впровадження нової технології у вже існуючі обчислювальні інфраструктури.[11]

Оптичний процесор Optalysys застосовується у різних галузях, включаючи геномні дослідження, криптографію та прогнозування погоди. У співпраці з Центром аналізу геному (TGAC) Optalysys розробляє систему генетичного пошуку GENESYS, яка дозволить значно знизити витрати на енергію при аналізі великих баз даних ДНК. Подібні проєкти демонструють здатність оптичних процесорів забезпечувати високопродуктивні обчислення при значному зниженні енергоспоживання [12].

Таким чином, технологія Optalysys є перспективним напрямком розвитку обчислювальної техніки, яка поєднує високу продуктивність з енергоефективністю, що відкриває нові можливості для науки і техніки.

Оптичний процесор (LightOn LightOn's Optical Processing Unit)

Оптичний процесор LightOn є інноваційним фотонним співпроцесором, розробленим для прискорення обчислювальних завдань, особливо в галузі штучного інтелекту (ШІ) та високопродуктивних обчислень (HPC). Цей процесор використовує фотоніку для швидшої та енергоефективнішої обробки даних порівняно з традиційними електронними процесорами.



Основні характеристики та переваги:

1. LightOn's Optical Processing Unit (OPU) може досягати продуктивності до 1,5 PetaOPS при споживанні лише 30 Вт. Це робить його значно ефективнішим з точки зору енергоспоживання порівняно з традиційними процесорами, такими як GPU(графічні процесори)
2. LightOn's OPU легко інтегрується в існуючі обчислювальні системи, працюючи у тандемі з традиційними CPU та GPU. Це дозволяє підвищити загальну продуктивність систем без значних змін в інфраструктурі
3. Один з прикладів використання LightOn OPU є його інтеграція в суперкомп'ютер Jean Zau у Франції. Цей суперкомп'ютер використовує фотонний співпроцесор для прискорення виконання випадкових алгоритмів у великому масштабі, що значно підвищує продуктивність обчислень у різних наукових і дослідницьких проєктах
4. LightOn's OPU розроблений спеціально для прискорення навчання моделей ШІ та обробки великих обсягів даних. Наприклад, він здатний виконувати 1500 випадкових проєкцій в секунду, що робить його надзвичайно ефективним для обробки великих наборів даних[13]

Переваги для користувачів:

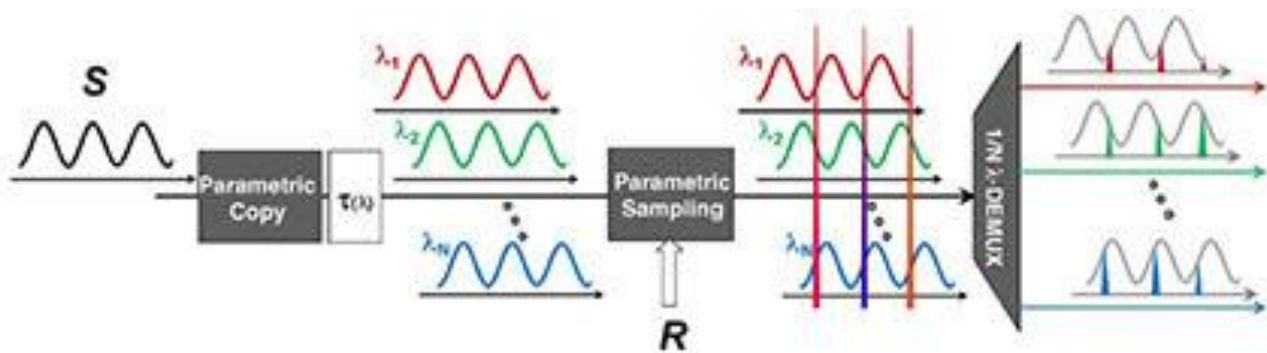
- Завдяки високій швидкості обчислень, LightOn's OPU дозволяє значно скоротити час обробки даних.
- Зменшення енергоспоживання та тепловиділення робить цей процесор привабливим вибором для великих обчислювальних центрів.

- Можливість легкої інтеграції з існуючими системами дозволяє використовувати OPU у різних галузях, включаючи наукові дослідження, промисловість та інші сфери, де потрібні високопродуктивні обчислення.

Таким чином, оптичний процесор LightOn представляє собою значний крок вперед у сфері високопродуктивних обчислень і штучного інтелекту, забезпечуючи високу продуктивність та енергоефективність.

Процесор оптичного сигналу Каліфорнійського університету в Берклі (University of California, Berkeley's Optical Signal Processor):

Інженери Каліфорнійського університету в Берклі розробили перший у світі мікропроцесор з інтегрованими фотонними інтерфейсами, що дозволяє процесору використовувати світло для комунікації з зовнішнім світом. Цей проривний чип розміром 3 x 6 мм містить два процесорних ядра, 70 мільйонів транзисторів і 850 фотонних компонентів, включаючи кільцевий модулятор з кремнію, фотодетектор із кремній-германію і вертикальний ґратчастий з'єднувач для підключення чипа до зовнішнього світу.



Цей фотонний інтерфейс значно підвищує пропускну здатність і енергоефективність. Наприклад, щільність пропускну здатності чипа становить 300 гігабіт на секунду на квадратний міліметр, що у 10-50 разів перевищує показники електричних мікропроцесорів. Споживання енергії складає 1.3 пікоджоулі на біт, що еквівалентно 1.3 Вт для передачі одного терабіта даних за секунду. Фотонний інтерфейс також дозволяє передавати дані на великі відстані без значного збільшення споживаної енергії, що робить цей підхід особливо привабливим для використання в дата-центрах.[14]

Ця розробка вже призвела до створення двох стартапів: SiFive, що комерціалізує процесори RISC-V, та Ayar Labs, який займається фотонними інтерфейсами. Ayar Labs отримала MIT Clean Energy Prize і продовжує розвиватися через Citris Foundry стартап-інкубатор в UC Berkeley.

Таким чином, цей новий фотонний процесор має потенціал суттєво змінити спосіб обробки та передачі даних, особливо в масштабах великих дата-центрів, забезпечуючи вищу ефективність та зниження енергоспоживання.

Процесор фотонної оптичної нейронної мережі (POMP) від DARPA представляє собою передову технологію, що використовує світло для обробки інформації, значно підвищуючи швидкість та ефективність нейронних мереж. Цей процесор розроблено для застосування в галузі штучного інтелекту та високопродуктивних обчислень.

Основні характеристики та переваги POMP:

1. POMP використовує фотоніку для передачі даних, що дозволяє обробляти інформацію значно швидше порівняно з традиційними електронними процесорами. Фотоніка забезпечує високу пропускну здатність і можливість паралельної обробки великої кількості даних.

2. Використання світла для обробки даних значно знижує енергоспоживання. Це особливо важливо для великих обчислювальних центрів і систем, де енергоспоживання є критичним фактором.

3. Процесор спеціально розроблений для прискорення нейронних мереж. Завдяки фотонним компонентам, він здатен виконувати нелінійні активаційні функції з меншою затримкою і більшою точністю, що є важливим для складних моделей штучного інтелекту.

4. POMP може адаптуватися до різних обчислювальних задач, забезпечуючи універсальність у застосуванні. Це дозволяє використовувати його в різних галузях, від наукових досліджень до промислових додатків.

Застосування:

1. РОМР може використовуватися в наукових проєктах, що вимагають високої продуктивності, таких як моделювання кліматичних змін або аналіз геномних даних .

2. Підвищення ефективності виробничих процесів за допомогою передових алгоритмів ШІ, що реалізовані на фотонних процесорах.

3. Прискорення аналізу медичних даних, розробка нових методів діагностики та лікування завдяки високопродуктивним обчисленням.

РОМР від DARPA демонструє, як фотоніка може радикально змінити обчислювальні технології, забезпечуючи високу продуктивність і енергоефективність для різних застосувань в галузі штучного інтелекту та інших наукоємних областях.[16]

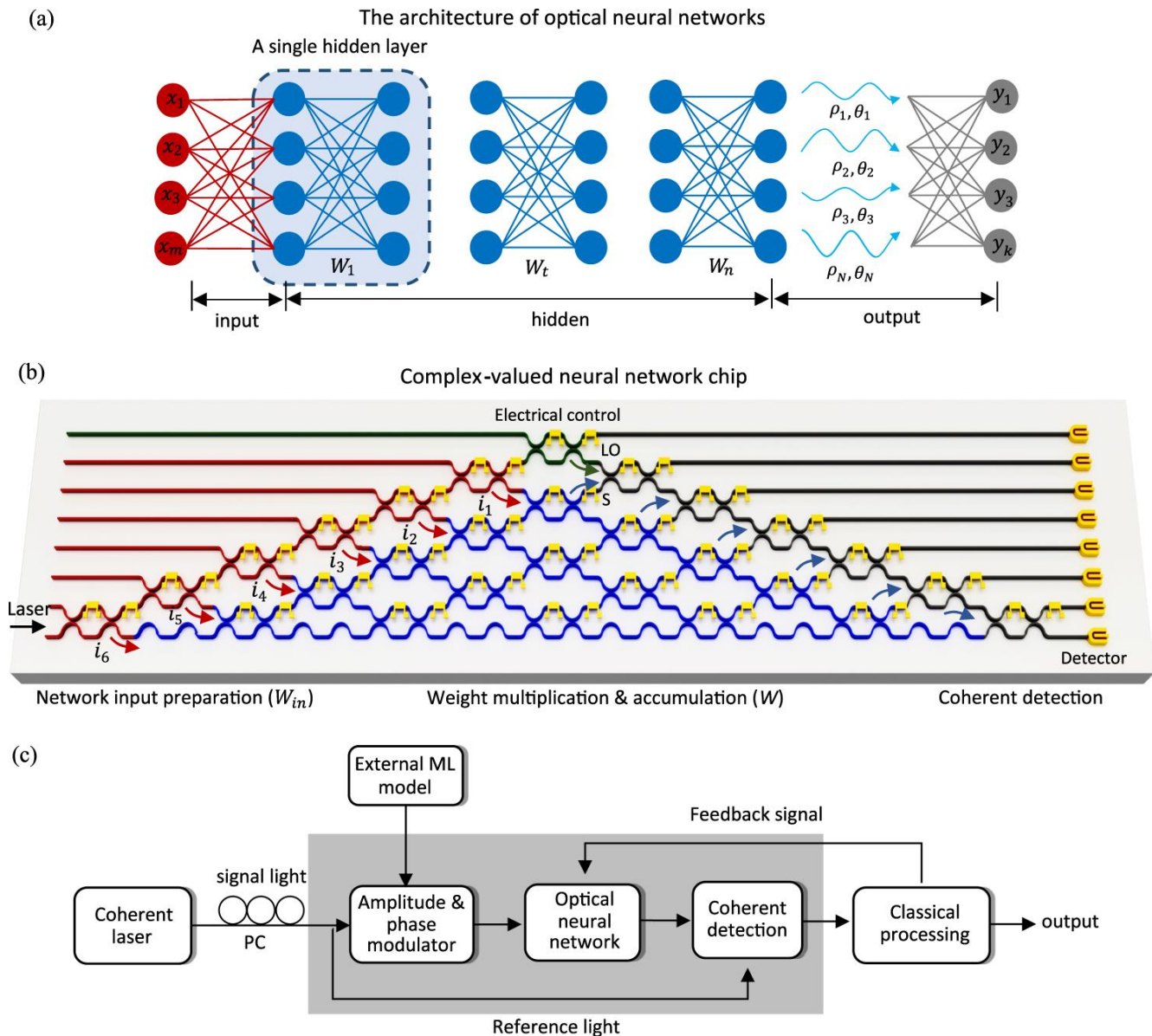
Процесор оптичної нейронної мережі NEC (NEC's Optical Neural Network Processor):

Процесор оптичної нейронної мережі NEC є передовим фотонним пристроєм, розробленим для обробки інформації з високою швидкістю і ефективністю. Цей процесор використовує фотоніку для обробки сигналів, що дозволяє значно підвищити швидкість обчислень і зменшити споживання енергії порівняно з традиційними електронними процесорами.

Основою технології є використання оптичних нейронних мереж, які обробляють інформацію у вигляді світлових сигналів. Це дозволяє реалізувати різні функції, такі як мультिकанальне оптичне перемикавання, оптичне розщеплення сигналів та налаштовувані оптичні фільтри, що здійснюються за допомогою самообучення. Такі процесори здатні автоматично налаштовуватися для виконання різних завдань, що робить їх універсальними для багатьох застосувань.

Однією з основних переваг оптичного процесора NEC є його здатність до швидкої і ефективної обробки великих обсягів даних, що робить його ідеальним для використання в центрах обробки даних та мережевих інфраструктурах. Також важливо відзначити, що оптичні системи значно знижують затримку і споживання енергії, що є критично важливим для сучасних високопродуктивних обчислень.[17]

Загалом, технології, розроблені NEC, демонструють значний потенціал для майбутнього комп'ютерних і телекомунікаційних систем, відкриваючи нові можливості для обробки інформації та підвищення ефективності сучасних обчислювальних систем.



1.6 Технічні характеристики сучасних когерентних оптичних процесорів

Сучасні когерентні оптичні процесори використовуються для різних застосувань, таких як телекомунікації, оптичні обчислення та сенсорика. Ці процесори забезпечують високошвидкісну обробку даних завдяки використанню когерентної оптики. Нижче наведено огляд основних технічних характеристик сучасних когерентних оптичних процесорів.

Сучасні когерентні оптичні процесори підтримують швидкості передачі даних на рівні терабіт на секунду (Tbps). Це досягається за рахунок використання складних модуляційних форматів, таких як квадратична амплітудна модуляція (QAM) і багаторівнева імпульсно-кодової модуляції (PAM) .

Підтримка декількох каналів передачі, що дозволяє одночасно обробляти великі об'єми даних.

2. Чутливість і шум

Використання технологій когерентного детектування забезпечує високу чутливість до слабких сигналів, що дозволяє зменшити потужність передавачів і збільшити дальність передачі .

Використання передових технологій, таких як гомодинний або гетеродинний детекції, дозволяє мінімізувати шум і поліпшити якість сигналу .

3. Спектральна ефективність

Завдяки використанню складних модуляційних форматів і мультиплексування з поділом за довжиною хвилі (WDM), когерентні оптичні процесори досягають високої спектральної ефективності, що дозволяє передавати більше даних на одиницю спектра .

Можливість динамічного налаштування параметрів передачі для оптимального використання спектра .

4. Стабільність і точність

Застосування стабільних лазерних джерел і точних методів фазової синхронізації забезпечує високу стабільність передачі даних .

Використання високоточних фазових детекторів та коригуючих алгоритмів для точного відтворення переданих сигналів.

5. Енергоефективність

Сучасні когерентні оптичні процесори розроблені з урахуванням енергоефективності, що забезпечує низьке споживання енергії при високій продуктивності .

Використання алгоритмів оптимізації для зменшення енергоспоживання без зниження якості сигналу.

6. Інтеграція і масштабованість

Сучасні когерентні оптичні процесори інтегрують велику кількість функцій на одному чіпі, що знижує розміри і вартість системи .

Можливість легко масштабувати системи для підтримки більш високих швидкостей передачі і більшої кількості каналів.

7. Обробка і корекція помилок

Використання технологій корекції помилок, таких як FEC (Forward Error Correction), для покращення надійності передачі даних. Адаптивні алгоритми обробки сигналів: Застосування адаптивних методів для компенсації викривлень сигналу і покращення якості передачі .

Приклади використання

Застосування в високошвидкісних мережах передачі даних, включаючи магістральні і підводні кабелі, де потрібна висока пропускна здатність і надійність. Використання в обчислювальних системах для швидкої обробки великих обсягів даних. Використання в оптичних сенсорах для точного вимірювання і моніторингу фізичних параметрів.

Основні джерела методичних похибок КОС

Для розв'язання різноманітних метрологічних задач застосовують когерентні оптичні спектроаналізатори. Однією з основних вимог до оптичної системи таких аналізаторів є точність юстування оптичних компонентів. Це обумовлено залежністю похибок просторових і енергетичних параметрів дифракційного зображення об'єкта від похибок складання та юстування оптичної системи. До цього часу питанням точності КОС не надавали достатньої уваги, тому дослідимо взаємозв'язок між похибками, які виникають під час юстування компонентів оптичної системи КОС, і похибками дифракційного зображення. [10]

Методика дослідження методичних похибок складається з кількох етапів:

1. **Теоретичний аналіз** Перший етап включає теоретичний аналіз потенційних джерел похибок. Це передбачає моделювання впливу похибок оптичних елементів на вихідні дані, аналіз впливу термічних коливань на стабільність системи та оцінку впливу шуму електронних компонентів на точність вимірювань.

2. **Експериментальні дослідження** Другий етап включає проведення експериментів для вимірювання фактичних похибок у когерентних оптичних системах. Це включає регулярне калібрування оптичних та електронних компонентів для зменшення систематичних похибок, використання стандартних зразків і тестових об'єктів для вимірювання відхилень у результатах, а також проведення вимірювань при різних температурах для оцінки термічних похибок.

3. **Статистичний аналіз** Третій етап передбачає обробку отриманих даних з метою оцінки похибок. Це включає обчислення середніх значень вимірюваних параметрів та їхніх стандартних відхилень, аналіз залежностей між різними джерелами похибок, а також визначення межі похибки для кожного параметра.

Приклади методичних похибок

1. Похибка вимірювання амплітуди спектра

Похибка вимірювання амплітуди спектра може виникати через нестабільність джерела світла або варіації в чутливості детектора. Наприклад, якщо інтенсивність світлового пучка коливається, це може призвести до неточних вимірювань амплітуди.

2. Похибка вимірювання просторової частоти

Похибка вимірювання просторової частоти може бути викликана зміщенням або деформацією оптичних компонентів, таких як дифракційні ґратки. Це призводить до змін у розрахунковій частоті та неправильного визначення положення об'єктів.[18]

Дослідження методичних похибок когерентних оптичних систем є важливим етапом у забезпеченні їхньої точності та надійності. За допомогою теоретичного аналізу, експериментальних досліджень та статистичного аналізу можна визначити основні джерела похибок і розробити методи їх мінімізації. Це дозволяє підвищити точність вимірювань і забезпечити високу якість роботи когерентних оптичних систем.

Висновок

Цей розділ присвячений детальному аналізу сучасних методів оптичної обробки інформації та їхньому застосуванню в різних сферах. Розглянемо ключові аспекти кожної з підтем.

1. Оптична обробка та фільтрація інформації є важливими елементами в сучасних технологіях. Завдяки використанню властивостей світла, таких як інтерференція та дифракція, ці методи дозволяють виконувати складні обчислення з високою швидкістю та ефективністю. Оптичні системи обробки інформації знаходять застосування у сфері зв'язку, обробки зображень, а також у наукових дослідженнях.
2. Когерентні оптичні процесори представляють собою передові пристрої, які використовують когерентне світло для обробки інформації. Вони забезпечують високоточні та швидкі обчислення, що робить їх незамінними в таких галузях, як квантова інформатика та високошвидкісні комунікаційні системи.
3. Тепловізійні системи відіграють ключову роль у військовій сфері, забезпечуючи можливість виявлення та ідентифікації об'єктів у будь-яких умовах освітленості та погоди. Вони використовуються для розвідки, спостереження, наведення зброї та забезпечення безпеки. Сучасні тепловізійні системи характеризуються високою чутливістю та точністю, що значно підвищує їхню ефективність у бойових умовах.

4. Обробка тепловізійних зображень є критично важливою для підвищення точності та інформативності тепловізійних систем. Сучасні методи включають алгоритми підвищення роздільної здатності, фільтрації шумів, а також автоматичної ідентифікації та класифікації об'єктів. Ці методи дозволяють покращити якість зображень і забезпечити більш точну ідентифікацію цілей.
5. Огляд існуючих когерентних процесорів показав, що сучасні моделі здатні виконувати складні обчислення з високою швидкістю та точністю. Вони використовуються в різних галузях, включаючи телекомунікації, обробку сигналів та квантову інформатику. Технічні характеристики таких процесорів постійно вдосконалюються, що забезпечує їхню високу ефективність та надійність.
6. Сучасні когерентні оптичні процесори мають ряд ключових технічних характеристик, які роблять їх ефективними для різних застосувань. Серед них - висока швидкість обробки даних, точність, низьке енергоспоживання та можливість роботи з великими обсягами інформації. Вони є критично важливими для розвитку новітніх технологій у сфері обробки та передачі інформації.

Загалом, розглянуті підтемами аспекти підкреслюють важливість та перспективи розвитку оптичних методів обробки інформації, тепловізійних систем та когерентних процесорів, що мають великий потенціал для впровадження в різних галузях науки та техніки.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНОГО ПРОЦЕСОРА

2.1. Основні характеристики оптичного процесора

Оптичний процесор, особливо у контексті обробки космічних зображень, має кілька ключових характеристик, які визначають його ефективність та

функціональні можливості. Ці характеристики включають робочий діапазон просторових частот, просторову смугу пропускання, просторову спектральну роздільну здатність, енергетичну роздільну здатність, а також похибки вимірювання амплітуди спектра і просторової частоти.

Робочий діапазон просторових частот

Робочий діапазон просторових частот є критично важливою характеристикою для цифрових когерентних оптичних спектроаналізаторів (ЦКОС), які використовуються для обробки зображень та сигналів. Він визначає, які частоти вхідного сигналу можуть бути ефективно пропущені та проаналізовані системою. Цей параметр обмежує роздільну здатність системи та її здатність до аналізу складних структур.[20]

Робочий діапазон просторових частот описує діапазон частот, в межах якого всі частотні складові досліджуваного спектра можуть бути пропущені оптичною системою ЦКОС без значних втрат. Найбільша просторова частота визначає верхню межу цього діапазону.

Основні фактори, що впливають на робочий діапазон:

1. Оптичні компоненти:

- Якість лінз, дифракційних ґраток та інших оптичних елементів впливає на максимальну частоту, яку можна ефективно обробити. Дифракційний ліміт визначає мінімальну роздільну здатність системи, що впливає на верхню межу просторових частот.

- Оптичні елементи з високою числовою апертурою (NA) забезпечують більший робочий діапазон.

2. Числова апертура (NA):

- Числова апертура оптичної системи визначає, скільки світла з різних кутів може бути зібрано та оброблено. Чим більша числова апертура, тим більший робочий діапазон просторових частот.

- Числова апертура визначає кількість світла, яке може бути зібране з різних кутів, що впливає на здатність системи обробляти високочастотні компоненти сигналу.

3. Довжина хвилі світла

- Довжина хвилі світла безпосередньо впливає на роздільну здатність та просторову частоту, яку може обробляти система. Коротші довжини хвиль дозволяють досягти вищої роздільної здатності і більшого діапазону частот.

- Оптичні системи, які працюють на коротших довжинах хвиль (наприклад, ультрафіолетове світло), можуть досягати більш високих просторових частот.

4. Детектори:

- Чутливість та роздільна здатність детекторів (наприклад, CCD-камер) впливають на якість аналізу та точність визначення просторових частот.

- Чутливі детектори з високою роздільною здатністю дозволяють краще розрізняти просторові частоти в межах робочого діапазону.[21]

Просторова смуга пропускання (Space Bandwidth Product, SBP)

Просторова смуга пропускання визначається кількістю роздільних точок, які здатний формувати спектроаналізатор. SBP є аналогом робочого спектрального діапазону і обчислюється за формулою:[10]

$$SBP = \frac{D_o}{a} = D_o \nu_{res} = \frac{D_o}{\lambda} \sin \varphi_{d1}, \quad (2.1)$$

де:

- D_o – діаметр вхідного транспаранта,
- ν_{res} – просторова частота, яка визначається періодом дифракційної ґратки,
- λ – довжина хвилі,
- φ_{d1} – максимальний кут дифракції.

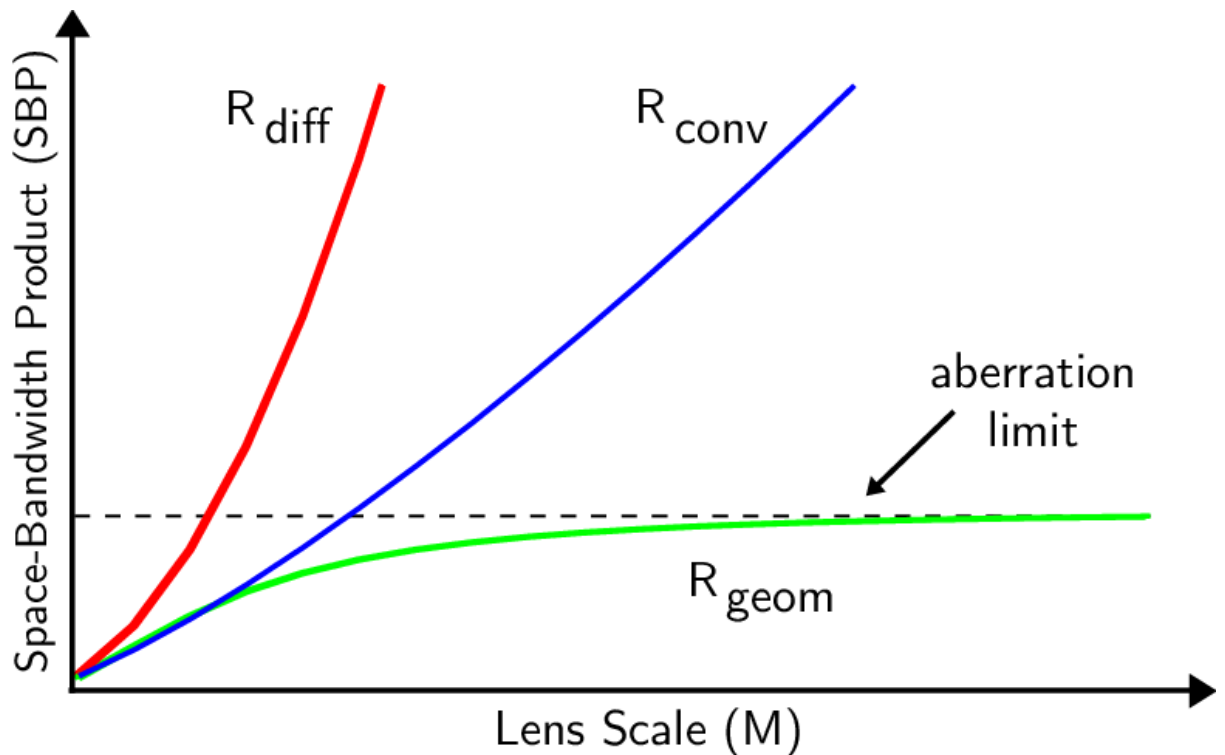


Рис. Просторова спектральна роздільна здатність

Просторова спектральна роздільна здатність (ПСРЗ) є важливою характеристикою оптичних систем, що визначає їхню здатність розрізняти близькі за просторовими частотами деталі. Ця характеристика є критичною для різних застосувань, таких як астрономічна обробка зображень, медична візуалізація, та дослідження матеріалів.[22]

Просторова спектральна роздільна здатність характеризується інтервалом частот, при яких система може розрізняти дві спектральні складові однакової амплітуди з частотами ν_1 та ν_2 . Вона визначає, наскільки близько розташовані спектральні компоненти можуть бути розрізнені оптичною системою.

Вплив на якість зображень

Висока просторова спектральна роздільна здатність дозволяє:

- Деталізовано аналізувати структури в зображеннях.
- Виявляти дрібні деталі, що можуть бути критичними в наукових дослідженнях або медичній діагностиці.
- Покращувати якість зображень шляхом розрізнення близьких спектральних компонентів.

Фактори, що впливають на просторову спектральну роздільну здатність

Оптичні компоненти:

- Якість лінз, дзеркал та інших оптичних елементів.
- Висока числова апертура забезпечує кращу роздільну здатність.

Детектори:

- Розмір пікселя детектора. Менші пікселі забезпечують вищу роздільну здатність.

- Чутливість детекторів також впливає на здатність розрізняти слабкі сигнали.

Спектроаналізатори:

- Якість та точність спектроаналізаторів, які використовуються для розділення спектральних компонентів.[23]

Коротші довжини хвиль дозволяють досягти вищої роздільної здатності.

Приклади використання

Висока просторова спектральна роздільна здатність необхідна для виявлення та аналізу далеких астрономічних об'єктів.

Для точного відтворення дрібних анатомічних деталей в медичних зображеннях.

Аналіз мікроструктури матеріалів, де необхідна висока точність розрізнення спектральних компонентів.

Енергетична роздільна здатність оцінює здатність приймача виявляти сигнали об'єктів на фоні шумів. Ключовим показником є поріг чутливості, який визначає найменший рівень освітленості або потоку випромінювання, що може бути зареєстрований приймальною системою. Порог чутливості відповідає мінімальному рівню сигналу, при якому відношення сигнал/шум дорівнює одиниці.[24]

Похибка вимірювання амплітуди спектра – це різниця між амплітудою світлового поля у площині аналізу і реальною амплітудою спектра сигналу для

певної просторової частоти. Ця похибка може впливати на точність отриманих результатів.

Ця характеристика визначається різницею між розрахунковою та реальною просторовими частотами для певної точки площини аналізу. Точність визначення просторової частоти є критичною для правильного відображення та аналізу спектральних даних .

Основні характеристики оптичного процесора, такі як робочий діапазон просторових частот, просторова смуга пропускання, просторова спектральна роздільна здатність, енергетична роздільна здатність, а також похибки вимірювання амплітуди спектра і просторової частоти, визначають його ефективність і можливості. Ці параметри важливі для оптимального функціонування процесора в різних застосуваннях, включаючи обробку космічних зображень.[25]

2.2. Цифровий когерентний оптичний спектроаналізатор

Цифровий когерентний оптичний спектроаналізатор (ЦКОС) використовується для аналізу оптичних характеристик різноманітних об'єктів за допомогою методів когерентної оптики та цифрової обробки сигналу. Функціональні перетворення світла у ЦКОС передбачають використання різноманітних оптичних технологій для поліпшення роздільної здатності, чутливості та точності аналізу.

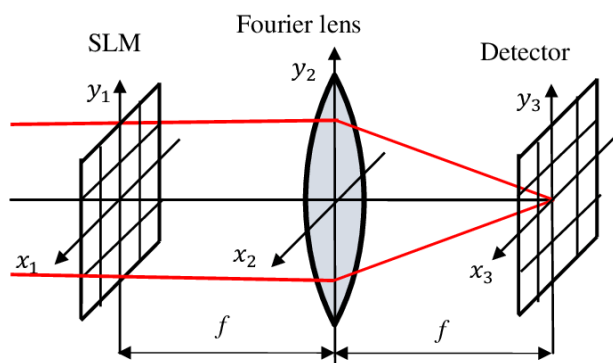


Рисунок 2.1. Схема ЦКОС

У процесі роботи ЦКОС, світловий промінь, який проходить через об'єкт дослідження, спрямовується до інтерферометра, де відбувається його розділення на

опорний та дослідницький промені. Опорний промінь використовується для порівняння фази з дослідницьким променем, що дозволяє виміряти фазові зміни, що відбуваються під час проходження світла через об'єкт. Далі, з допомогою детектора та цифрової обробки сигналу, отримані дані аналізуються та використовуються для відтворення тривимірних зображень структури об'єкта, вимірювання фізичних параметрів чи визначення характеристик матеріалів.[27]

Функціональні перетворення світла у ЦКОС можуть включати в себе ряд технологій та методів. Наприклад, використання оптичних фільтрів для відбору певних діапазонів довжини хвилі, що дозволяє підвищити специфічність аналізу. Також може бути застосована адаптивна оптика, яка коригує аберації та інші неідеальності в оптичній системі, поліпшуючи якість отриманих даних. Крім того, використання складних алгоритмів цифрової обробки сигналу дозволяє ефективно виявляти та аналізувати слабкі сигнали у присутності шуму.[28]

Загалом, функціональні перетворення світла у ЦКОС відображають сучасні технології, спрямовані на поліпшення точності, чутливості та роздільної здатності оптичного аналізу, що робить їх потужним інструментом у великому спектрі застосувань, від наукових досліджень до промислових застосувань.

Освітлювальна система в цифровому когерентному оптичному спектроаналізаторі

Компонентами освітлювальної системи ЦКОС є когерентне джерело світла та розширювач пучка.

Ключовим елементом освітлювальної системи є когерентне джерело світла. Зазвичай використовуються лазерні діоди або газові лазери, що надають монохроматичне та когерентне світло. Висока когерентність дозволяє використовувати інтерференційні ефекти для точних вимірювань оптичних параметрів об'єктів.

Для забезпечення рівномірного освітлення об'єкта використовується розширювач пучка. Його завдання - перетворити конусоподібний пучок світла з джерела випромінювання в плоску хвилю. Це досягається за допомогою оптичних

компонентів, таких як коліматори або лінзи, які розподіляють світло рівномірно по всій площі об'єкта.

Фур'є-об'єктив

Цей об'єктив здатний перетворювати просторову інформацію з однієї області в іншу з надзвичайною точністю та ефективністю.

По суті, лінза з перетворенням Фур'є - це спеціалізований оптичний компонент, розроблений для оптичного перетворення Фур'є. Він працює в рамках оптики Фур'є - дисципліни, присвяченої математичному аналізу поширення світла. На відміну від звичайних лінз, які фокусують світлові промені для формування зображення, лінза з перетворенням Фур'є маніпулює просторовими частотами для кодування інформації з однієї області, наприклад, просторової, в іншу, наприклад, частотну.[29]

Механізм роботи лінзи з перетворенням Фур'є полягає в її здатності змінювати просторовий частотний вміст оптичного вхідного сигналу. Це досягається завдяки складному розташуванню оптичних компонентів, які змінюють хвильові фронти світла. Коли світло проходить через лінзу, воно зазнає перетворень, які завершуються перетворенням Фур'є вхідного сигналу, що генерується у фокальній площині лінзи. Цей складний процес дозволяє швидко обробляти просторову інформацію, що робить його безцінним у галузях, які потребують аналізу та маніпулювання оптичними даними в режимі реального часу.

Універсальність лінз з перетворенням Фур'є знаходить застосування в широкому спектрі дисциплін:

- **Обробка сигналів:** Використовуються для аналізу та маніпулювання сигналами, закодованими в оптичній формі, наприклад, в радіолокаційних і гідролокаційних системах.

- **Обробка зображень:** Дозволяє перетворювати просторову інформацію в зображення, полегшуючи виконання таких завдань, як фільтрація, стиснення і розпізнавання образів.

- **Спектроскопія:** Відіграє життєво важливу роль в аналізі оптичних спектрів, допомагаючи в ідентифікації матеріалів на основі їх унікальних спектральних сигнатур.

- **Телекомунікації:** Покращує передачу даних, полегшуючи кодування і декодування оптичних сигналів у різних форматах.

Окрім своїх основних функцій, об'єktiv з перетворенням Фур'є знаходить застосування в найсучасніших галузях:

- **Медична візуалізація:** Революціонує методи діагностичної візуалізації, уможлиблюючи розширену обробку медичних зображень, що призводить до підвищення точності діагнозів.

- **Астрономія:** Полегшення аналізу небесних об'єktiv і явищ шляхом вилучення складних деталей з астрономічних зображень, допомагаючи астрономам розгадувати таємниці Всесвіту.

- **Квантові обчислення:** Піонерські досягнення у квантовій обробці інформації шляхом використання унікальних властивостей світла, прокладаючи шлях до обчислювальних парадигм наступного покоління.

Хоча лінза перетворення Фур'є має величезні перспективи, вона також стикається з низкою проблем:

- **Складність:** Розробка і впровадження лінз з перетворенням Фур'є вимагає складної інженерії і точного вирівнювання, що створює проблеми у виготовленні і калібруванні.

- **Обмеження:** Незважаючи на свою універсальність, лінза має невід'ємні обмеження, такі як обмежена роздільна здатність і чутливість до аберацій, що вимагає постійних досліджень для її вдосконалення та покращення.

- **Вартість:** Висока вартість, пов'язана з розробкою і впровадженням лінз з перетворенням Фур'є, може обмежити їхню доступність, особливо в умовах обмежених ресурсів.

Забігаючи наперед, можна сказати, що майбутнє лінз з перетворенням Фур'є сповнене можливостей:

Мініатюризація: Досягнення в нанотехнологіях і методах мікровиробництва можуть призвести до розробки компактних і легких об'єктів з перетворенням Фур'є, що розширить сферу їх застосування в різних галузях.

Покращена продуктивність: Поточні дослідження в галузі матеріалознавства та оптики обіцяють підвищити продуктивність і ефективність лінз з перетворенням Фур'є, відкриваючи нові горизонти в оптичній інженерії.

Міждисциплінарна співпраця: Спільні зусилля дослідників з різних галузей, включаючи фізику, інженерію та інформатику, є ключем до розкриття повного потенціалу лінз з перетворенням Фур'є і відкриття ери безпрецедентних інновацій.

Функціональні перетворення світла у ЦКОС

Функціональні перетворення світла у цифровому когерентному оптичному спектроаналізаторі (ЦКОС) є ключовими етапами процесу аналізу оптичних характеристик об'єктів. Основним завданням цих перетворень є перетворення оптичних сигналів у цифрові дані, які можуть бути оброблені та інтерпретовані для отримання корисної інформації про об'єкт.[30]

Нижче наведені основні функціональні перетворення світла у ЦКОС:

1. Когерентне випромінювання створюється за допомогою лазерів, які генерують стабільний оптичний сигнал з постійною фазою. Лазери можуть бути різних типів, включаючи твердотільні, газові, волоконні та напівпровідникові. Когерентність забезпечує постійну фазову різницю між хвилями, що дозволяє здійснювати точну інтерференцію і більш детальний аналіз світлових хвиль.

2. Колімування світла включає використання лінз або дзеркал для формування паралельного світлового пучка. Це необхідно для рівномірного освітлення об'єкта аналізу і мінімізації оптичних спотворень. Оптичні компоненти, що використовуються для колімування, включають колімуючі лінзи, асферичні лінзи або параболічні дзеркала.

3. Для розкладання світлового пучка на спектральні компоненти використовуються дифракційні ґратки або призми. Це дозволяє аналізувати

просторову частотну інформацію об'єкта. Просторові спектри утворюються завдяки дифракції або дисперсії світла, що забезпечує розділення на різні частоти.

4. Модуляція – це процес накладання інформаційного сигналу на оптичний носій. Модуляція може бути амплітудною, фазовою або частотною. Демодуляція є зворотним процесом, при якому інформаційний сигнал виділяється з оптичного носія. Це необхідно для подальшої обробки і аналізу сигналу.

5. Фур'є-перетворення дозволяє переходити від просторового до частотного домену. Це критично важливо для аналізу частотних компонент оптичного сигналу. Фур'є-перетворення виконується за допомогою лінз Фур'є, які фокусують світло таким чином, що у фокальній площині утворюється спектр.

6. Інтерференційні методи використовуються для отримання інтерференційної картини, яка несе інформацію про фазові та амплітудні зміни в оптичному сигналі. Когерентна детекція включає вимірювання фазових зсувів та амплітудних коливань, що дозволяє визначати точні характеристики оптичного сигналу.

7. Цифрова обробка сигналів включає такі етапи:

- Дискретизація: Перетворення оптичного сигналу у цифрову форму. Це включає вибірку сигналу з певною частотою для подальшої обробки.
- Квантування: Перетворення амплітуд сигналу у дискретні значення.
- Фільтрація: Видалення шумів та небажаних компонент з цифрового сигналу.

Вихідний сигнал ЦКОС

Вихідний сигнал ЦКОС - це результат оптичного аналізу, що виражений у вигляді цифрового сигналу. Цей сигнал містить інформацію про взаємодію світла з досліджуваним об'єктом та може включати різні параметри, такі як інтенсивність світла, фаза, амплітуда, часовий розподіл та інші.

Вихідний сигнал ЦКОС може бути представлений у вигляді дискретних значень, що виміряні в кожній точці досліджуваного об'єкта або на його поверхні. Ці значення можуть бути відображені у формі двовимірного або тривимірного зображення, яке відображає структуру або властивості об'єкта.[31]

Однак, вихідний сигнал ЦКОС може бути не просто набіром числових даних. Він може бути обробленим за допомогою спеціалізованих алгоритмів обробки сигналу для виявлення особливостей, аналізу структури, виявлення дефектів чи інших характеристик досліджуваного об'єкта.

Загалом, вихідний сигнал ЦКОС є основою для подальшого аналізу та інтерпретації даних. Він дозволяє вивчати властивості та характеристики об'єктів, досліджувати їх структуру та взаємодію з світлом, а також робити висновки щодо їхнього фізичного стану чи хімічного складу.

Характеристики вихідного сигналу ЦКОС

Амплітуда сигналу

Амплітуда вихідного сигналу відображає інтенсивність світлового поля, що аналізується. Ця характеристика дозволяє оцінювати енергетичні властивості вхідного сигналу та є критичною для визначення рівня сигнал/шум.

Просторова частота

Вихідний сигнал містить інформацію про просторові частоти вхідного оптичного сигналу. Просторова частота визначається як обернена величина періоду структури сигналу і відображає деталізацію зображення.

Фаза сигналу

Фазова інформація вихідного сигналу є важливою для когерентної обробки, що дозволяє зберігати інформацію про взаємне розташування різних частин сигналу. Це особливо важливо для реконструкції зображень.

Спектральна роздільна здатність

Спектральна роздільна здатність вихідного сигналу визначає здатність ЦКОС розрізняти близькі по частоті складові вхідного сигналу. Це впливає на точність та деталізацію аналізу спектра.

Часова стабільність

Часова стабільність вихідного сигналу важлива для забезпечення постійної якості аналізу протягом часу. Флуктуації в сигналі можуть призводити до похибок у вимірюваннях.

Процес формування вихідного сигналу

ЦКОС складається з оптичних елементів, таких як дифракційні ґратки, Фур'є-лінзи та детектори, які працюють спільно для аналізу вхідного сигналу. Процес формування вихідного сигналу можна розділити на кілька етапів:

1. Вхідний сигнал

Оптичний сигнал надходить на вхід ЦКОС, де він проходить через дифракційну ґратку, розділяючись на компоненти за просторовими частотами.

2. Спектральний аналіз

Фур'є-лінза фокусується на спектральних компонентах сигналу, утворюючи спектр у фокальній площині. Дифракційні явища дозволяють розкласти сигнал на складові частоти.

3. Детектування

Детектори (наприклад, матриці фотодіодів або CCD-камери) реєструють інтенсивність та фазу спектральних компонентів, перетворюючи їх на електричні сигнали, які можуть бути оброблені цифровими методами.[33]

Обробка та аналіз вихідного сигналу

Вихідний сигнал ЦКОС підлягає подальшій обробці з метою виділення корисної інформації. Цей процес включає:

Цифрову обробку сигналу (DSP)

Цифрові алгоритми використовуються для обробки сигналів, отриманих з детекторів. Це може включати фільтрацію, перетворення Фур'є, демодуляцію та інші методи.

Калібрування

Калібрування необхідне для забезпечення точності вимірювань. Це включає корекцію похибок, викликаних оптичними компонентами та детекторами.

Аналіз даних

Розрахунок характеристик сигналу, таких як спектральна потужність, фаза, та інші параметри, необхідні для подальшого використання в різних прикладних задачах.

Вихідний сигнал ЦКОС несе важливу інформацію про спектральні та просторові характеристики вхідного оптичного сигналу. Правильне формування та обробка цього сигналу дозволяє отримати високоякісні дані, необхідні для різних застосувань, включаючи обробку космічних зображень.[34]

Граничні характеристики цифрового оптико-електронного процесора

Цифрові оптико-електронні процесори (ЦОЕП) поєднують оптичні та електронні технології для обробки зображень і сигналів. Їх граничні характеристики визначаються технічними обмеженнями оптичних компонентів, електронних детекторів і алгоритмів обробки. Основні граничні характеристики включають:

Просторова роздільна здатність

Просторова роздільна здатність ЦОЕП визначає найменші деталі, які можуть бути розрізнені у зображенні. Вона залежить від якості оптичних компонентів (лінз, дифракційних ґраток) та розміру пікселів детекторів.

Фізичні обмеження: Найменший розмір деталі визначається дифракційним лімітом, який залежить від довжини хвилі світла λ і числової апертури NA оптичної системи.

Спектральна роздільна здатність

Спектральна роздільна здатність характеризує здатність процесора розрізняти близькі по частоті спектральні компоненти.

Фізичні обмеження: Вона визначається шириною спектральної лінії, яка може бути розділена, і залежить від роздільної здатності оптичних компонентів і характеристик спектроаналізаторів.[35]

Часова роздільна здатність

Часова роздільна здатність визначає здатність процесора аналізувати змінювані з часом сигнали.

Фізичні обмеження: Вона залежить від швидкості реакції детекторів і електроніки. Високошвидкісні детектори та швидка обробка сигналу забезпечують кращу часову роздільну здатність.

Енергетична роздільна здатність

Енергетична роздільна здатність оцінює здатність приймача виявляти сигнали об'єктів на фоні шумів.

Фізичні обмеження: Вона залежить від чутливості детекторів та рівня шуму в системі. Порог чутливості визначає найменший рівень сигналу, який може бути зареєстрований.[36]

Динамічний діапазон

Динамічний діапазон характеризує здатність процесора обробляти сигнали з широким діапазоном інтенсивностей.

Фізичні обмеження: Він визначається співвідношенням між найсильнішим і найслабшим сигналом, який може бути зареєстрований детекторами без втрати інформації.

Похибки вимірювання

Похибки вимірювання включають неточності у визначенні амплітуди, фази, частоти та інших параметрів сигналу.

Фізичні обмеження

Похибки можуть бути викликані недосконалістю оптичних і електронних компонентів, а також шумами та інтерференцією.

Граничні характеристики цифрового оптико-електронного процесора визначають його ефективність і можливості в обробці оптичних сигналів. Вони залежать від якості оптичних компонентів, чутливості та швидкості детекторів, а також точності алгоритмів обробки. Оптимізація цих характеристик є ключовою для розробки високопродуктивних оптико-електронних систем.[37]

Висновок

У підрозділі 2.1 були окреслені ключові параметри оптичного процесора, що визначають його ефективність та продуктивність. Зокрема, ми зосередились на таких характеристиках, як пропускна здатність, роздільна здатність, швидкість обробки даних та енергоефективність. Аналіз цих параметрів дозволяє зрозуміти потенціал оптичних процесорів у порівнянні з традиційними електронними системами обробки інформації.

Підрозділ 2.2 був присвячений цифровому когерентному оптичному спектроаналізатору, який є важливим інструментом для аналізу спектральних характеристик оптичних сигналів. Ми розглянули основні принципи його роботи, включаючи використання когерентної детекції, цифрової обробки сигналів та методів спектрального аналізу. Також було приділено увагу алгоритмам, що забезпечують високу точність та швидкість аналізу спектру.

На основі проведеного аналізу, можна зробити висновок, що розробка та оптимізація характеристик оптичних процесорів та спектроаналізаторів є важливим напрямом для подальшого розвитку оптичних інформаційних технологій. Запропонована методика розрахунку основних характеристик надає необхідний інструментарій для ефективного проектування та вдосконалення цих пристроїв, що дозволить покращити їх продуктивність та розширити сферу застосування у сучасних телекомунікаційних та обчислювальних системах.

РОЗДІЛ 3.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОГЕРЕНТНИХ ОПТИЧНИХ СПЕКТРОАНАЛІЗАТОРІВ

3.1. Принципи роботи та теоретичні основи когерентних оптичних спектроаналізаторів

Принципи роботи:

Інтерферометрія є ключовим принципом, що використовується в когерентних оптичних спектроаналізаторах (КОС). Вона заснована на явищі інтерференції світлових хвиль і дозволяє проводити високоточні вимірювання довжини хвиль,

фазових зсувів і спектрального складу оптичних сигналів. Розглянемо детальніше основні аспекти інтерферометрії, зокрема типи інтерферометрів, їхню роботу та застосування.

1. Інтерференція виникає, коли дві або більше когерентних світлових хвиль перекриваються, створюючи області посилення і зменшення інтенсивності світла в залежності від різниці фаз між хвилями. Інтерферометри використовують це явище для створення інтерференційних патернів, які містять інформацію про оптичний шлях, довжину хвилі та інші характеристики світлових хвиль.

2. Інтерферометри Маха-Цендера та Мікельсона є основними типами інтерферометрів, які широко використовуються для різних завдань у когерентних оптичних спектроаналізаторах (КОС). Вони обидва використовують явище інтерференції для вимірювання різниці фаз та довжин хвиль, але мають різну конструкцію і принципи роботи. [39]

Теоретичні основи:

Теорія Фур'є

Перетворення Фур'є: КОС використовують перетворення Фур'є для аналізу інтерференційного сигналу. Перетворення Фур'є дозволяє перейти від часової області до частотної, що дає можливість визначити спектральний склад сигналу.

Когерентність

Когерентність джерела світла: КОС вимагають висококогерентних джерел світла, таких як лазери, для забезпечення стабільної інтерференційної картини. Когерентність визначає здатність хвильного фронту підтримувати стабільні фазові відносини на великих відстанях і часах.

Просторова та тимчасова когерентність: Просторова когерентність означає однаковість фази світла в різних точках поперечного перерізу променя, тоді як тимчасова когерентність визначає когерентність хвилі в часі.

Інтерференційні схеми

Інтерферометр Фабрі-Перо: Використовується для створення багаторазової інтерференції шляхом відбиття світла між двома напівпрозорими дзеркалами. Це дозволяє отримати дуже високі спектральні роздільні здатності.

Інтерферометр Маха-Цендера: Використовується для розділення вхідного світлового променя на два промені, які проходять різні оптичні шляхи, а потім знову об'єднуються, створюючи інтерференційну картину.

Компоненти когерентних оптичних спектроаналізаторів

Джерело когерентного світла

- Лазер: Основне джерело когерентного світла, яке забезпечує стабільне випромінювання з високою когерентністю і вузьким спектральним діапазоном.
- Світлодіод (LED): Використовується в деяких випадках, але має нижчу когерентність порівняно з лазером.

Оптичні елементи для розділення променів

- Напівпрозорі дзеркала: Використовуються для розділення вхідного світлового променя на два або більше променів, які проходять різними оптичними шляхами.
- Біпризми: Оптичні призми, які також можуть використовуватися для розділення променів.

Інтерферометр

- Інтерферометр Маха-Цендера: Розділяє вхідний промінь на два промені, які проходять різні оптичні шляхи і потім знову об'єднуються для створення інтерференційного патерну.
- Інтерферометр Мікельсона: Вхідний промінь розділяється на два промені, які відбиваються від дзеркал і знову об'єднуються, утворюючи інтерференційний патерн.
- Інтерферометр Фабрі-Перо: Світловий промінь багаторазово відбивається між двома паралельними напівпрозорими дзеркалами, створюючи багаторазові інтерференційні патерни.

Детектори світла

- Фотодіоди: Напівпровідникові прилади, які перетворюють світло в електричний сигнал. Використовуються для вимірювання інтенсивності світла.
- Фотомножники (РМТ): Високочутливі прилади для виявлення слабких світлових сигналів. Забезпечують високу чутливість і швидкий відгук.

Оптичні фільтри

- Інтерференційні фільтри: Пропускають певний спектральний діапазон і блокують інші довжини хвиль. Використовуються для виділення потрібних спектральних компонентів.
- Дихроїчні дзеркала: Дзеркала, які відбивають світло в одному спектральному діапазоні і пропускають у іншому.

Обробка і аналіз сигналу

- Аналогові та цифрові перетворювачі: Перетворюють світлові сигнали в електричні для подальшого аналізу.
- Комп'ютерна система: Використовується для обробки отриманих даних, виконання спектрального аналізу та візуалізації результатів. Програмне забезпечення може включати алгоритми перетворення Фур'є, методи фільтрації і аналізу спектральних ліній.

Додаткові компоненти

Системи стабілізації

- Стабілізатори температури: Забезпечують стабільну роботу лазерів і інших компонентів, чутливих до змін температури.
- Стабілізатори напруги: Забезпечують постійну напругу для електронних компонентів, що важливо для підтримки стабільної роботи системи.

Оптичні волокна

- Волоконні світловоди: Використовуються для передачі світлових сигналів між різними компонентами системи з мінімальними втратами.

Оптичні лінзи і дзеркала

- Коліматори: Лінзи, які забезпечують паралельність світлових променів.
- Фокусуєчі лінзи: Використовуються для збирання світла і фокусування його на детекторі.
- Дзеркала: Використовуються для відбиття і направлення світлових променів в потрібному напрямку.

Методи обробки сигналів КОС

Обробка сигналів у когерентних оптичних спектроаналізаторах (КОС) є важливим етапом, який дозволяє перетворити отримані інтерференційні патерни в корисну спектральну інформацію. Існує кілька методів обробки сигналів, які використовуються для аналізу та інтерпретації даних. Нижче розглянемо основні методи обробки сигналів у КОС.

Основні методи обробки сигналів

Перетворення Фур'є дозволяє перейти від часової області до частотної, що є основою для аналізу спектрального складу сигналу. Цей метод використовується для аналізу інтерференційних картин, отриманих від інтерферометрів.

Використовується для виділення спектральних компонентів сигналу, визначення частот і фазових характеристик.

Алгоритм *швидкого перетворення Фур'є* є оптимізованим методом обчислення перетворення Фур'є, що значно зменшує час обробки сигналу.

Використовується для реального часу аналізу сигналів, особливо в системах з великим обсягом даних.

Цифрові фільтри використовуються для виділення певних частотних діапазонів або для приглушення шумів у сигналах. Використовується для очищення сигналу від шуму, виділення корисної спектральної інформації.

Вейвлет-перетворення дозволяє аналізувати сигнали як у часовій, так і в частотній областях одночасно, що є корисним для аналізу сигналів зі змінними частотними характеристиками.

Використовується для обробки сигналів, де є важливою локалізація частотних компонентів у часі, наприклад, для аналізу імпульсних сигналів.

Крос-кореляція використовується для визначення схожості між двома сигналами і зсуву між ними, що допомагає виявити затримки і фазові зсуви. Використовується для визначення часових затримок між сигналами, фазового зсуву та виявлення періодичних компонентів.

3.2. Калібрування та точність вимірювань когерентних оптичних спектроаналізаторів

Калібрування та забезпечення точності вимірювань у когерентних оптичних спектроаналізаторах (КОС) є важливими аспектами для отримання достовірних та повторюваних результатів. Нижче розглянуто основні методи та принципи калібрування та забезпечення точності вимірювань в КОС.

1. Оптичні еталони

Використовують стабільні лазери або інших джерел світла з відомими спектральними характеристиками для калібрування спектроаналізаторів. Відомий еталонний спектр подається на вхід спектроаналізатора, і отриманий спектр порівнюється з очікуваними значеннями. Відхилення використовуються для налаштування або корекції вимірювань.

2. Спектральні лампи

Спектральні лампи (наприклад, лампи з ртуті або неону) випромінюють світло з відомими дискретними спектральними лініями. Спектральні лінії лампи використовуються для перевірки та налаштування спектральної шкали аналізатора.

3. Інтерферометричні методи

Використання інтерферометрів з точно відомими оптичними шляхами для створення стабільних інтерференційних патернів. Вимірювані інтерференційні картини порівнюються з теоретично очікуваними для перевірки та корекції спектральних вимірювань.

4. Зовнішні еталони

Використання зовнішніх еталонів, таких як фільтри з відомими передавальними характеристиками або фотодетектори з відомими спектральними відповідями. Відомі характеристики зовнішніх еталонів використовуються для калібрування спектральної шкали та чутливості спектроаналізатора.

Точність вимірювань

1. Спектральна роздільна здатність

Принцип роботи полягає в тому що вона визначає здатність спектроаналізатора розрізняти близькі по частоті спектральні компоненти. Залежить від якості оптичних компонентів, стабільності джерела світла та методів обробки сигналу. Поліпшити можна використовуючи високоякісні інтерферометри, стабільні лазерні джерела і передові методи цифрової обробки сигналів.

2. Точність частотного вимірювання

Принцип роботи полягає в тому що вона визначає точність визначення центральної частоти спектральної лінії. Залежить від стабільності джерела світла, якості калібрування та точності обробки сигналів. Поліпшити можна таким шляхом : регулярне калібрування з використанням точних еталонів, використання високостабільних джерел світла.

3. Чутливість

Принцип роботи полягає в тому що вона визначає мінімальний рівень сигналу, який може бути виявлений спектроаналізатором. Залежить від ефективності детектора, шумових характеристик системи та методів обробки сигналу. Поліпшити можна використовуючи високочутливі детектори зниження рівня шуму в системі, застосовувати методи підвищення сигналу (наприклад, накопичення даних).

4. Лінійність

Принцип роботи полягає в тому що вона визначає, наскільки виміряний спектральний відгук відповідає реальному спектру вхідного сигналу. Залежить від характеристик оптичних компонентів і детекторів. Поліпшити можна регулярною перевіркою лінійності за допомогою еталонних джерел та корекція вимірювань.

Застосування методів калібрування

1. Регулярне виконання калібрування за допомогою оптичних еталонів, спектральних ламп та інших методів для забезпечення стабільності та точності вимірювань.
2. Використання автоматизованих систем калібрування, які можуть виконувати самостійне калібрування за встановленим графіком або за необхідності.
3. Регулярна перевірка та валідація результатів вимірювань за допомогою незалежних методів та порівняння з іншими спектроаналізаторами.

3.3. Проблеми проєктування оптичних систем КОС

Оптичні інформаційні системи (ОІС) стали невід'ємною частиною сучасних телекомунікаційних мереж, завдяки своїй здатності передавати великі обсяги даних на великі відстані з мінімальними втратами. Ці системи використовують світло для передачі інформації, що забезпечує високу швидкість та надійність комунікаційних процесів.

Аналізатори когерентного спектра виділяються серед інших систем обробки даних завдяки своїй простоті. При виборі системи для вирішення конкретних завдань дуже важливо забезпечити дотримання всіх необхідних параметрів системи, які характеризують ефективність приладу. Фундаментальні фізичні принципи когерентних аналізаторів добре вивчені та описані в численних монографіях і статтях. Однак не всі методи проєктування оптичних систем когерентних аналізаторів повністю розроблені і задокументовані. [39]

Когерентний аналізатор спектра (КАС) є передовим інструментом для аналізу оптичних сигналів з високою роздільною здатністю. Його використання охоплює такі галузі, як телекомунікації, спектроскопія, а також наукові та медичні дослідження. Розглянемо принцип роботи, основні компоненти та застосування когерентного аналізатора спектра.

Когерентний аналізатор спектра складається з джерела когерентного світла (лазерного променя), прозорого середовища, що характеризується амплітудним коефіцієнтом пропускання, об'єктива та ПЗС-матриці. Всі компоненти послідовно розташовані один відносно одного. Лінза, що використовується для спектрального аналізу, називається Фур'є-лінзою.

Принцип роботи когерентного аналізатора полягає в спектральному розкладанні просторового сигналу. Це дозволяє аналізувати одночасно амплітудний і фазовий спектри як одновимірних, так і двовимірних сигналів. Світло поширюється від джерела і дифрагує на прозорій поверхні з певним коефіцієнтом пропускання. Фур'є-лінза формує просторовий спектр вхідного сигналу. Після цього фотоприймач фіксує розподіл освітленості, а комп'ютер виконує аналіз параметрів спектра. Сигнал на виході оптичної системи збігається (з постійним коефіцієнтом) з перетворенням Фур'є вхідного сигналу. Тому вихідна площина такої системи називається площиною Фур'є.[21]

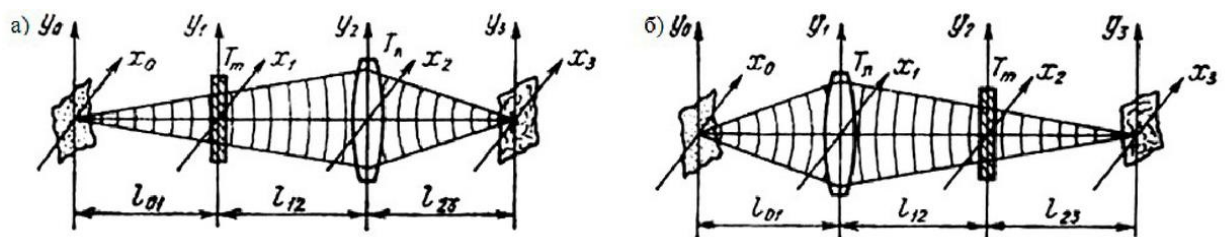


Рисунок 3.1. Схеми побудови когерентного аналізатора спектра: а - коли прозорість розташована перед лінзою; б - коли прозорість розташована за лінзою

Переваги когерентного аналізатора спектра

- Висока роздільна здатність: Забезпечує детальний аналіз спектральних компонентів.
- Точність і стабільність: Висока точність вимірювань завдяки когерентному випромінюванню та використанню інтерферометричних методів.
- Широкий спектр застосувань: Можливість використання в різних галузях, від телекомунікацій до медицини та наукових досліджень.

Виклики у використанні когерентного аналізатора спектра

- Складність і вартість: Висока складність конструкції і велика вартість впровадження та експлуатації.

- Необхідність стабільного джерела світла: Потреба у високостабільних лазерних джерелах для точних вимірювань.

- Чутливість до зовнішніх впливів: Вплив зовнішніх факторів, таких як температурні коливання та механічні вібрації, може впливати на точність вимірювань.[40]

У підсумку, когерентні аналізатори спектра є потужним інструментом для точного і детального аналізу спектральних характеристик оптичних сигналів, що робить їх незамінними в багатьох сучасних технологіях та наукових дослідженнях.

3.4. Технологічні інновації в когерентних оптичних спектроаналізаторах (КОС)

Когерентні оптичні спектроаналізатори (КОС) є важливими інструментами для спектрального аналізу, які знаходять застосування в різних галузях науки і техніки, включаючи телекомунікації, біомедицину, матеріалознавство та інші. За останні роки в цій сфері відбулося багато технологічних інновацій, що значно покращили їхні характеристики. Ось деякі з них:

1. Покращені джерела світла. Використання лазерів з дуже вузькою спектральною лінією дозволяє значно підвищити роздільну здатність спектроаналізаторів. Інновації в широкосмугових джерелах світла, таких як суперлюмінесцентні діоди, покращують можливість аналізу широкого спектрального діапазону з високою точністю.

2. Сучасні детектори. Нові типи кремнієвих фотодетекторів мають підвищену чутливість і нижчий рівень шуму, що дозволяє виявляти слабкі сигнали. Використання нових матеріалів, таких як графен та перовськіти, підвищує ефективність вловлювання фотонів.

3. Високоточні інтерферометри. Інтеграція інтерферометрів на фотонні чипи дозволяє зменшити розміри пристроїв і підвищити їх стабільність. Автоматизація

налаштування інтерферометрів з використанням систем зворотного зв'язку значно підвищує точність і стабільність вимірювань.

4. Цифрова обробка сигналів. Використання швидкого перетворення Фур'є (FFT) дозволяє значно прискорити обробку сигналів і зменшити затримки в аналізі. Інноваційні алгоритми цифрової обробки сигналів знижують рівень шуму, підвищуючи точність вимірювань.

5. Автоматизація та програмне забезпечення. Використання програмного забезпечення з елементами штучного інтелекту дозволяє автоматично калібрувати та налаштовувати спектроаналізатори, зменшуючи людський фактор. Можливість віддаленого контролю та моніторингу спектроаналізаторів через інтернет дозволяє зручно керувати пристроями та отримувати результати в режимі реального часу.

6. Мікроелектромеханічні системи (MEMS). Використання мікроелектромеханічних систем (MEMS) дозволяє створювати компактні і високоточні інтерферометри, що можуть бути інтегровані у портативні спектроаналізатори.

7. Квантові технології. Використання квантової когерентності для підвищення роздільної здатності і чутливості спектроаналізаторів. Інновації в квантових детекторах, що використовують ефекти квантової заплутаності для підвищення ефективності детектування фотонів.[41]

3.5. Переваги технологічних інновацій

- Підвищена точність
- Широкий спектральний діапазон
- Зменшення розмірів і вартості
- Автоматизація процесів.

Технологічні інновації в когерентних оптичних спектроаналізаторах дозволяють значно покращити їхні характеристики, підвищуючи точність, чутливість і роздільну здатність вимірювань. Інноваційні джерела світла, сучасні детектори, високоточні інтерферометри, алгоритми цифрової обробки сигналів та

автоматизація процесів роблять КОС більш ефективними та доступними для широкого кола застосувань.

Висновок

Загальний аналіз показує, що когерентні оптичні спектроаналізатори є потужним інструментом для спектрального аналізу завдяки своїй високій точності та роздільній здатності. Незважаючи на існуючі проблеми проектування та необхідність удосконалення калібрувальних методів, технологічні інновації відкривають нові горизонти для розвитку КОС. Подальші дослідження у цій галузі залишаються необхідними для покращення характеристик та розширення можливостей цих приладів, що робить їх незамінними в сучасних наукових та технічних дослідженнях.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОГЕРЕНТНИХ ОПТИЧНИХ СПЕКТРОАНАЛІЗАТОРІВ

4.1 Схеми стенду КОС

Випробувальний стенд цифрового когерентного оптичного спектрального аналізатора працює за принципом когерентного виявлення і цифрової обробки сигналів для аналізу спектральних характеристик оптичних сигналів. Ось як це зазвичай працює. Тестовий стенд приймає оптичний сигнал, який потрібно проаналізувати. Це може бути сигнал від оптичного волокна, лазерного джерела або будь-якого іншого оптичного пристрою, що тестується. Вхідний оптичний сигнал змішується з сигналом локального генератора. Цей процес змішування забезпечує когерентне детектування, при якому зберігається інформація про фазу і амплітуду оптичного сигналу. Це має вирішальне значення для точного спектрального аналізу. Змішаний сигнал перетворюється на електричний за допомогою фотоприймача. Цей електричний сигнал несе інформацію про оптичний сигнал, включаючи його амплітуду і фазу. Електричний сигнал з фотоприймача оцифровується за допомогою високошвидкісних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). На цьому етапі безперервний електричний сигнал

перетворюється на цифровий, який може бути оброблений за допомогою алгоритмів цифрової обробки сигналів (ЦОС). Оцифрований сигнал піддається різним методам цифрової обробки сигналу для вилучення інформації про спектральні характеристики оптичного сигналу. Це можуть бути такі методи, як перетворення Фур'є, фільтрація, еквалізація та вдосконалені алгоритми посилення сигналу. Оброблений цифровий сигнал аналізується для визначення спектральних характеристик вхідного оптичного сигналу. Це включає визначення спектральних компонентів, їхніх амплітуд, фаз і будь-яких інших відповідних параметрів. Результати спектрального аналізу зазвичай відображаються на екрані комп'ютера або інших пристроях виводу. Це можуть бути спектральні графіки, гістограми або інші візуальні представлення спектра оптичного сигналу.

На оптичній лаві послідовно розташовані лазер 1 з блоком живлення 2, розширювач лазерного пучка 3, вхідний транспарант (тест-об'єкт) 4, фур'є-об'єктив 5, молочна пластинка (прозорий екран) 6, світлофільтр 7, болометр 8, комп'ютер 9 (рис 4.1).

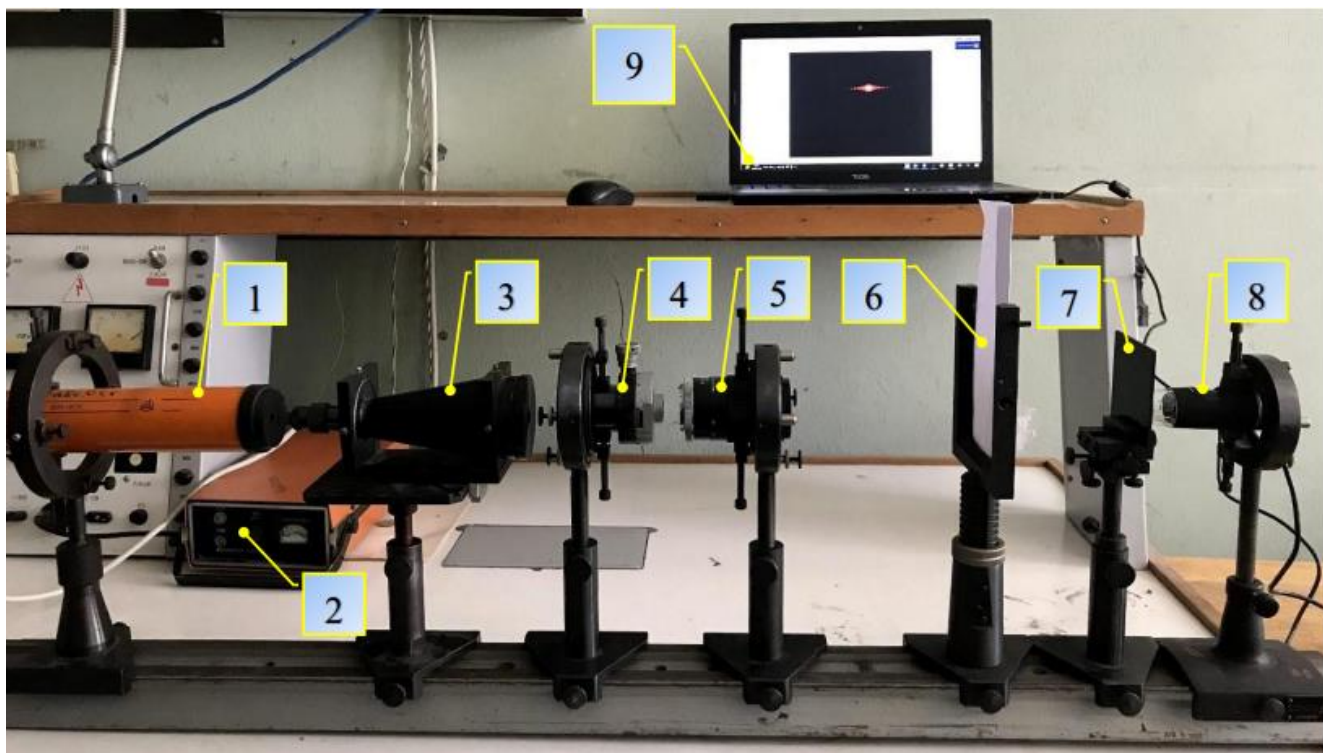


Рисунок 4.1. Лабораторний стенд когерентного оптичного спектроаналізатора

Для створення когерентного випромінювання було використано два типи лазерів: гелій-неоновий лазер ЛГН-105 і напівпровідниковий лазер від фірми Transverse Industries (Тайвань). Лазер ЛГН-105 має характеристики: довжина хвилі випромінювання $\lambda = 0,5523$ мкм; потужність випромінювання $\Phi = 2$ мВт; кут розбіжності лазерного пучка $\theta l = 3$ мрад. Напівпровідниковий лазер від фірми Transverse Industries (Тайвань) характеризується: довжина хвилі випромінювання $\lambda = 0,452$ мкм; потужність випромінювання $\Phi = 5$ мВт; кут розбіжності лазерного пучка $\theta l = 2$ мрад.

Світлофільтр з коефіцієнтом пропускання τf або два поляризатори, чие пропускання залежить від закону Малюса, використовуються для зменшення інтенсивності лазерного пучка.

Стандартний розширювач лазерного пучка, який входить до складу голографічної установки, використовується для розширення діаметра лазерного пучка. Це потрібно для освітлення всієї апертури вхідного транспаранта. Розширювач збільшує діаметр лазерного пучка в 5 разів, що означає, що транспарант освітлюється лазерним пучком діаметром 10,2 мм.

Тестовим об'єктом є стандартна оптична щілина, ширина якої може бути змінена за допомогою мікрометричного гвинта від 0 до 1,25 мм з кроком шкали 5 мкм. Калібрування шкали щілини було проведено за допомогою вимірювального мікроскопа. В стенді також використовуються інші тестові об'єкти, такі як діафрагми з круглими і прямокутними отворами та дифракційна ґратка з періодом 10 мкм для розсіювання світла.

Для фур'є-просторового перетворення використовується високоякісний фотографічний об'єктив "Юпитер – 11" з фокусною відстанню 135 мм і відносним отвором 0,25, де діаметр вхідної зіниці становить 33,75 мм.

Для реєстрації та вимірювання просторового спектра тестового об'єкта використовується USB-мікроскоп - Sigeta Expert 10-300 \times 5.0 Megapixel, який дозволяє відтворити розподіл яскравості у задній фокальній площині об'єктива на екрані монітора комп'ютера. Відповідні комп'ютерні програми болометра

дозволяють провести геометричні вимірювання в дифракційній картині та розподіл інтенсивності в просторовому спектрі тестового об'єкта.

4.2 Інтерферометр Маха-Цендера

Інтерферометр Маха-Цендера - це витончений оптичний прилад, що дозволяє вивчати інтерференцію світла. Його робота починається з джерела світла, зазвичай лазера, який забезпечує когерентний світловий промінь. Цей промінь потрапляє на світлоподільник, який розділяє його на два окремі промені.

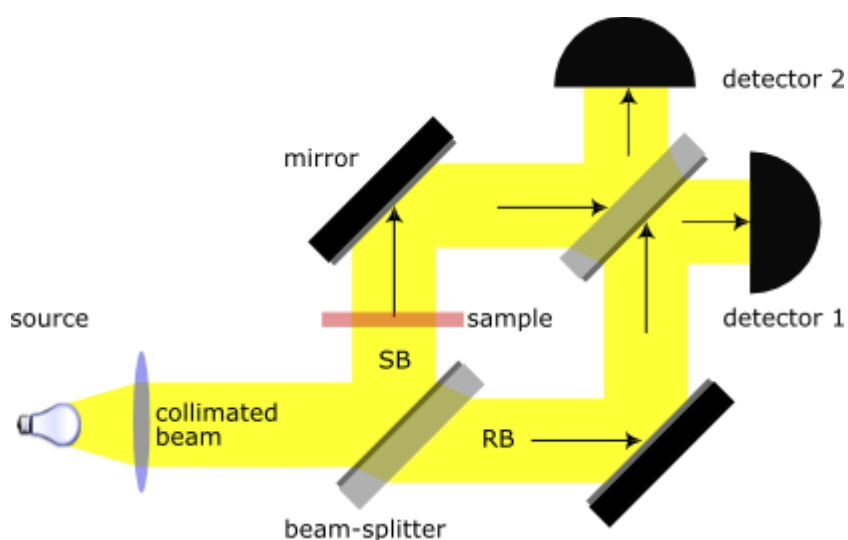


Рис. 4.2. Інтерферометр Маха-Цендера

Далі ці промені відбиваються дзеркалами, які спрямовують їх по різних траєкторіях. Після проходження своїх шляхів, промені знову об'єднуються за допомогою комбінатора променів. У цей момент відбувається інтерференція: об'єднані промені взаємодіють, створюючи інтерференційний візерунок. Детектор реєструє цей візерунок, який відображає різницю в оптичних шляхах двох променів.

Принцип роботи інтерферометра включає кілька етапів. Спочатку світлоподільник розділяє вхідний світловий промінь на два. Потім ці промені

проходять свої траєкторії, які можуть мати різну довжину або включати різні середовища. Після цього промені знову об'єднуються, і на виході з'являється інтерференційний візерунок. Цей візерунок залежить від різниці в оптичних шляхах променів, що дозволяє дуже точно вимірювати зміни в оптичній фазі.

Інтерферометр Маха-Цендера має широкий спектр застосувань. Він дозволяє виявляти надзвичайно малі зміни в оптичній фазі, що робить його корисним для високоточних вимірювань. Також він використовується для визначення оптичних властивостей матеріалів, таких як показник заломлення. Крім того, цей інструмент є незамінним для перевірки якості оптичних компонентів та систем, а також для проведення експериментів у галузі квантової механіки та оптики.

4.3 Вимірювання розподілу інтенсивності світла у дифракційній картині, яка сформована тест-об'єктом

Розглянемо щілину як тест-об'єкт, ширина якої може змінюватися в певних межах. Припустимо, що щілина освітлюється когерентним випромінюванням з амплітудою V_0 і довжиною хвилі λ . Використовуючи рівняння

$$V(x_3, y_3) = \frac{V_0}{j\lambda f} \iint S_1 t_0(x_1, y_1) \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda f} (x_3 x_1 + y_3 y_1)] dx_1 dy_1$$

визначимо розподіл амплітуди випромінювання у задній фокальній площині $x_3 y_3$ фур'є-об'єктива b для одновимірного випадку.

$$V(x_3, 0) = \frac{V_0 t_{ob}}{j\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} t_0(x_1, 0) \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda f} x_3 x_1) dx_1, (4.1)$$

де t_{ob} – амплітудний коефіцієнт пропускання фур'є-об'єктива; $t_0(x_1, 0)$ – амплітудний коефіцієнт пропускання щілини

$$t_0(x_1, 0) = t_0(x_1) = \begin{cases} 1 & \text{коли } -\frac{a}{2} \leq x_1 \leq \frac{a}{2}, \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases}, (4.2)$$

Інтеграл (4.1) одновимірний просторовий спектр $\tilde{t}_0(v_x)$ амплітудного коефіцієнта пропускання щілини для просторової частоти $v_x = \frac{x_3}{\lambda f}$ з точністю до множника $\frac{V_0 t_{ob}}{j\lambda f}$, тобто

$$V(x_3) = \frac{V_0 t_{ob}}{j\lambda f} \tilde{t}_0\left(v_x = \frac{x_3}{\lambda f}\right), (4.3)$$

з цієї формули ми можемо знайти вираз для обчислення просторового спектра тест-об'єкта

$$\tilde{t}_0\left(v_x = \frac{x_3}{\lambda f}\right) = jV(x_3) \frac{j\lambda f}{V_0 t_{ob}}, (4.4)$$

Підставимо (4.2) до (4.1) і вийде

$$V(x_3) = \frac{V_0 t_{ob}}{j\lambda f} \int_{-a/2}^{a/2} \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda f} x_3 x_1) dx_1, (4.5)$$

Обчислення інтеграла (4.5) дає такий результат

$$V(x_3) = \frac{V_0 t_{ob} a}{j\lambda f} \frac{\sin(\frac{\pi a}{\lambda f} x_3)}{\frac{\pi a}{\lambda f} x_3}, (4.6)$$

Підставимо (4.6) до (4.4)

$$\tilde{t}_0\left(v_x = \frac{x_3}{\lambda f}\right) = a \frac{\sin(\frac{\pi a}{\lambda f} x_3)}{\frac{\pi a}{\lambda f} x_3}, (4.7)$$

USB-мікроскоп реєструє не амплітуду поля (x_3), а інтенсивність світла на екрані

$$I(x_3) = \tau_p |V|_2 = \tau_p V \cdot V^*, (4.8)$$

де τ_p – коефіцієнт пропускання пластинки

Після підстановки (4.6) до (4.8) маємо

$$I(x_3) = \tau_p \left[\frac{V_0 t_{ob} a}{j\lambda f} \frac{\sin(\frac{\pi a}{\lambda f} x_3)}{\frac{\pi a}{\lambda f} x_3} \right]^2. (4.9)$$

Для того щоб визначити інтенсивність у центрі дифракційної картини коли $x_0 = y_0 = 0$ потрібно використати границю $\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin x}{x}\right) = 1$.

З виразу (4.9)

$$I(0) = \text{тр} \left[\frac{V_0 t_{ob} a}{j \lambda f} \right]^2. \quad (4.10)$$

Після цього одновимірний розподіл нормованої інтенсивності у задній фокальній площині фур'є-об'єктива можна описати такою функцією, яка показана на рисунку 4.2

$$I_n(x_3) = \frac{I(x_3)}{I(0)} \text{тр} \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda f} x_3\right)}{\frac{\pi a}{\lambda f} x_3} \right]^2, \quad (4.11)$$

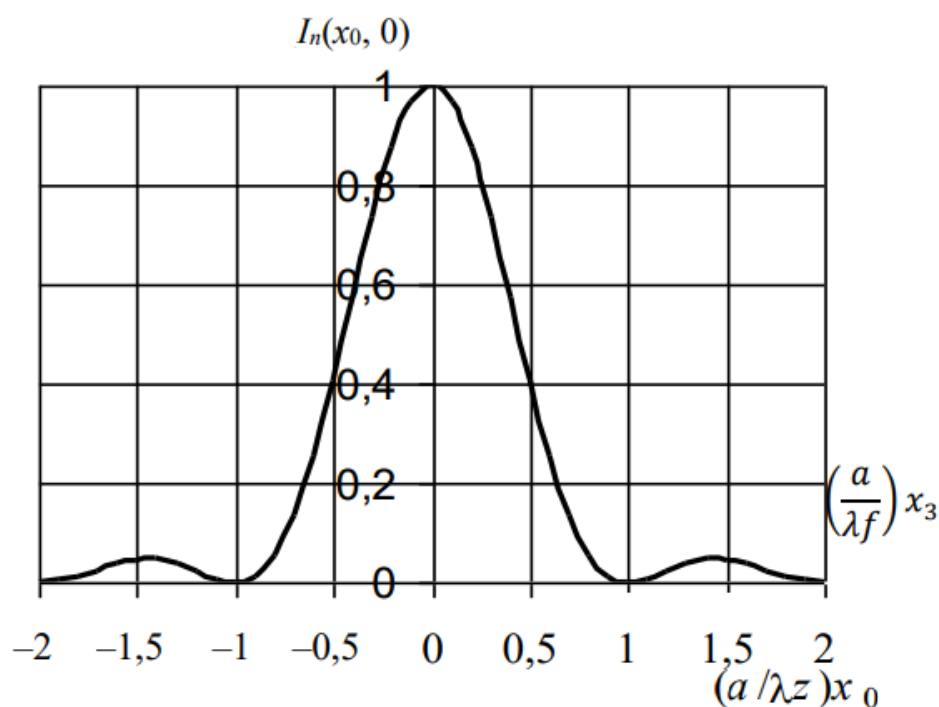


Рисунок 4.3. Одновимірний розподіл нормованої інтенсивності

1. Визначаємо положення передньої та задньої фокальної площини фур'є-об'єктива. Спочатку фокусуємо об'єктив за шкалою на нескінченність. Потім за допомогою коліматора вимірюємо положення сфокусованого тестового об'єкта відносно корпусу об'єктива. Такі вимірювання проводимо в прямому та зворотному напрямках променів.

2. На оптичній лаві встановлюємо вхідну щілину у передній фокальній площині об'єктива, а прозорий екран – у його задній фокальній площині (рис. 4.2).

3. Шляхом юстування стенду досягаємо рівномірного освітлення щілини.

4. Фокусуємо USB-мікроскоп на зображення дифракційної картини на прозорому екрані, яке відображається на екрані комп'ютера. Записуємо дифракційну картину в пам'ять комп'ютера.

5. Використовуючи відповідне програмне забезпечення, вимірюємо профіль інтенсивності дифракційної картини вздовж осі x_3 і визначаємо координати перших двох мінімумів.

6. Встановлюємо світлофільтр з коефіцієнтом ослаблення τ_x і виконуємо вимірювання. Якщо амплітуда сигналу профілю інтенсивності зменшилась в τ_x разів, це свідчить про те, що USB-мікроскоп перетворює інтенсивність у вихідний сигнал на лінійній ділянці функції передачі сигналу мікроскопа.

7. Нормуємо амплітуду профілю відносно максимального значення сигналу і отримуємо функцію (4.11). Для підтвердження достовірності розглянутих оптичних перетворень порівнюємо теоретично і експериментально отримані функції (4.11) для різних значень ширини щілини.

8. Замість гелій-неонового лазера використовуємо напівпровідниковий лазер і проводимо вимірювання.

4.4 Визначення відповідності положень дифракційних максимумів у площині спектрального аналізу їх просторовій частоті

Метою цих вимірювань є підтвердження достовірності теоретично отриманих формул для визначення просторової частоти максимумів дифракційної картини, яка утворюється тест-об'єктом у вигляді щілини. Для початку потрібно розглянути теорію визначення просторової частоти у максимумі функції (4.11), для цього потрібно розв'язати диференціальне рівняння

$$\frac{dI_n(x_3)}{dx_3} = 0; \rightarrow \frac{d}{dz} \left(\frac{\sin z}{z} \right) = 0; \rightarrow \operatorname{tg} z = z, \quad (4.12)$$

$$\text{де } z = \frac{\pi a}{\lambda f} x_3.$$

1. Для початку використаємо розподіл освітленості в дифракційній картині, який ми отримали в пунктах 4 і 5 підрозділу 4.2.1. Завдяки комп'ютерній програмі визначимо відстані між боковими максимумами: $\Delta x_{31} = x_{3,+1} - x_{3,-1}$, де $x_{3,+1}$ і $x_{3,-1}$ — координати +1-го і -1-го максимумів;

$\Delta x_{32} = x_{3,+2} - x_{3,-2}$, де $x_{3,+2}$ і $x_{3,-2}$ – координати +2-го і -2-го максимумів. Положення дифракційних максимумів розраховується за такою формулою $x_{3i} = 0,5\Delta x_{3i}$.

2. Проведемо вимірювання для різної ширини щілини a для двох лазерів.
3. Порівнюємо результати експериментальних вимірювань x_{3i} з теоретичними розрахунками.

4.5 Вимірювання просторових спектрів тест-об'єктів, отриманих з використання двох лазерів з різними довжинами хвиль

1. Визначимо просторовий спектр амплітудного коефіцієнта пропускання круглої діафрагми діаметром $2R_0$

$$\tilde{t}_0(v_r) = \pi R_0^2 \frac{2J_1(2\pi R_0 v_r)}{2\pi R_0 v_r}, \quad (4.14)$$

де J_1 – функція Бесселя першого порядку; v_r – просторова частота у полярній системі координат

$$v_r = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \frac{r_3}{\lambda f}, \quad (4.15)$$

Тепер розрахуємо Нормований розподіл інтенсивності у задній фокальній площині фур'є-об'єктива

$$I_n(r_3) = \left[\frac{2J_1(2\pi R_0 v_r)}{2\pi R_0 v_r} \right]^2, \quad (4.16)$$

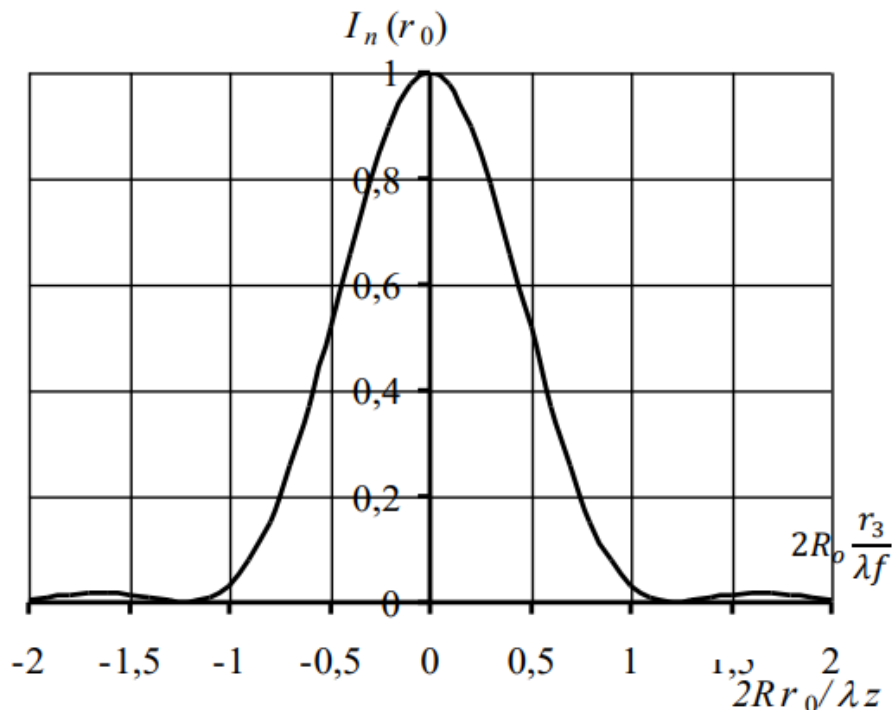


Рисунок 4.4. Одновимірний розподіл нормованої інтенсивності

Розглянемо послідовність вимірювання функції (4.16).

1. У передній фокальній площині об'єктива на оптичній лаві встановлюємо діафрагму з круглим отвором, а у задній фокальній площині розміщуємо прозорий екран (рис. 4.2).

2. Фокусуємо USB-мікроскоп на зображення дифракційної картини, яке відображається на прозорому екрані та дисплеї комп'ютера. Записуємо дифракційну картину на комп'ютер.

3. За допомогою відповідної програми вимірюємо інтенсивність профілю дифракційної картини вздовж осі x_3 , яка проходить через центр нульового максимуму, і визначаємо координати першого мінімуму.

4. Нормуємо амплітуду профілю відносно максимального значення сигналу, отримуючи функцію (4.16). Порівнюємо теоретично і експериментально отримані функції (4.16) для різних діаметрів діафрагми $2R_0$, щоб підтвердити точність оптичних перетворень.

5. Проводимо вимірювання згідно з пунктами 1–4, використовуючи напівпровідниковий лазер замість гелій-неонового лазера.

Аналогічно проводимо вимірювання для тест-об'єктів у вигляді дифракційної решітки і двовимірної періодичної просторової структури.

4.6 Вимірювання технічних характеристик КОС

Визначимо мінімальну просторову частоту $\nu_{x,min}$, яку може відтворити КОС. Для цього нам потрібно розташувати синусоїдальну міру з мінімальною частотою у вхідній площині спектроаналізатора x_1y_1

$$\nu_{g,min} = \frac{2}{a} . \quad (4.17)$$

Визначимо максимальну просторову частоту $\nu_{g,max}$, яку може відтворити КОС, для цього потрібно розташувати у вхідній площині спектроаналізатора x_1y_1 синусоїдальну міру з максимальною частотою. На цій ґратці відбувається дифракція, вона спричиняє відхилення паралельного пучка променів на деякий кут φ_d встановлюється частотою дифракційної ґратки. Знайдемо положення дифракційного максимуму

$$x_{3,max} = \frac{D_{p-a}}{2} , \quad (4.18)$$

Максимальну просторову частоту можна визначити за наступною формулою

$$\nu_{x,max} = \frac{x_{3,max}}{\lambda f} = \frac{D_{p-a}}{2\lambda f} . \quad (4.19)$$

За допомогою формул (4.18) та (4.19) у нас з'являється новий метод для визначення робочого діапазону просторових частот

1. У вхідну площину x_1y_1 спектроаналізатора встановлюємо дифракційну ґратку з просторовою частотою ν_g .

2. За допомогою USB-мікроскопа визначаємо координати дифракційного максимуму $x_{3,max}$ і його амплітуду u_{max} .

3. Апертурною діафрагмою фур'є-об'єктива зменшуємо діаметр вхідної зіниці D_p до тих пір, поки не почнеться зменшуватись амплітуда дифракційного максимуму u_{max} .

4. Підставляємо отримане значення діаметра D_p до формули (4.19) і розраховуємо просторову частоту $\nu_{x,max}$. Ця частота повинна дорівнювати частоті дифракційної ґратки ν_g .

5. Зміною діаметра апертурної діафрагми можна змінювати робочий діапазон просторових частот $\Delta\nu_x = \nu_{x,max} - \nu_{x,min} \approx \nu_{x,max}$ [9].

Просторова смуга пропускання (Spatial Bandwidth Product, SBP) — це характеристика системи, яка описує її здатність передавати просторові частоти або деталі зображення. SBP визначається як добуток просторової частоти (частоти, з якою змінюється яскравість зображення у просторі) на ширину поля зору. В оптичних системах, таких як мікроскопи або телескопи, SBP є важливим параметром, оскільки визначає, наскільки детально можна дослідити зображення.

Розрахуємо параметр SBP за формулою

$$SBP = \frac{D_p}{d} = D_p \nu_{x,max} = D_p \frac{D_p - a}{2\lambda f}. \quad (4.20)$$

Метод визначення максимальної просторової частоти $\nu_{x,max}$ було розглянуто при вимірюванні робочого діапазону просторових частот КОС. Просторове спектральне розділення $\delta\nu_x$ — це здатність КОС розрізняти (розділяти) дві спектральні складові однакової амплітуди з частотами ν_x та $\nu_x + \delta\nu_x$ [9].

Використаємо дифракційну ґратку з змінною просторовою частотою ν_g для того щоб виміряти параметр $\delta\nu_x$

$$d_g = d_{g0} \cos \theta_g. \quad (4.21)$$

Для вимірювання потрібно скористатися таким алгоритмом

1. Встановлюємо ґратку перпендикулярно до оптичної осі КОС, тобто $\theta_g = 0$.

2. Вимірюємо одновимірний розподіл інтенсивності у дифракційній картині згідно методики, що наведена в п. 4.2, і записуємо цей розподіл у пам'ять комп'ютера.

3. Змінюємо кут θ_g за допомогою поворотного оптичного рейтера, на якому встановлена дифракційна ґратка. При цьому просторова частота дифракційної ґратки визначається за формулою

$$\nu_g(\theta_g) = \frac{1}{d_g} = \frac{1}{d_{g0} \cos \theta_g} = \frac{\nu_{g0}}{\cos \theta_g} . \quad (4.22)$$

Для кожного значення кута вимірюємо розподіл інтенсивності у дифракційних картинах і записуємо у пам'ять комп'ютера.

4. За допомогою відповідної комп'ютерної програми формуємо зображення перших дифракційних максимумів, які утворені дифракційними ґратками з просторовими частотами ν_{g0} і $\nu_g(\theta_g)$. Мінімальний кут $\theta_{g,min}$, при якому ці два максимуми будуть спостерігатись роздільно, і визначає просторове спектральне розділення КОС [39]

$$\delta \nu_x = \nu_{g0} - \nu(\theta_{g,min}). \quad (4.23)$$

Похибка вимірювання просторової частоти

$$\delta \nu_x = \nu_x - \nu_{xm}. \quad (4.24)$$

У якості тест-об'єкта використаємо щілину шириною a , яка забезпечить якісну дифракційну картину. Одновимірний нормований розподіл інтенсивності у дифракційній картині визначається за формулою (4.11). Використовуючи цю формулу знайдемо теоретичне значення дифракційних мінімумів $x_{3,min,m}$ шляхом розв'язання рівняння

$$\begin{aligned} I_n(x_{3,min,m}) = 0; \rightarrow \sin\left(\frac{\pi a}{\lambda f} x_{3,min,m}\right) = 0; \quad \frac{\pi a}{\lambda f} x_{3,min,m} = m\pi; \rightarrow \\ \rightarrow x_{3,min,m} = \frac{\lambda f}{a} m, \end{aligned} \quad (4.25)$$

$m = \pm 1, \pm 2, \dots$ – номер дифракційного мінімуму.

Тоді просторова частота $\nu_{x,min,m}$, яка відповідає положенню m -го мінімуму дорівнює

$$\nu_{x,min,m} = \frac{x_{3,min,m}}{\lambda f} = \frac{m}{a}. \quad (4.26)$$

Використавши формули (4.25) та (4.26) ми можемо скористатися таким алгоритмом визначення похибки вимірювання просторової частот $\delta\nu_x$:

1. Використовуємо розподіл інтенсивності в дифракційній картині.
2. За допомогою відповідної комп'ютерної програми вимірюємо координати +1-го і -1-го дифракційних мінімумів $x_{3,min,+1}$ і $x_{3,min,-1}$.
3. Згідно формули (4.25) різниця між цими координатами

$$\Delta x_{3m,min} = x_{3,min,+1} - x_{3,min,-1} = \frac{2\lambda f}{a}. \quad (4.27)$$

4. З формули (4.26) знаходимо експериментальне значення вимірюваної просторової частоти, яка відповідає положенню першого дифракційного мінімуму

$$\nu_{x,min,1} = \frac{\Delta x_{3m,min}}{2\lambda f}. \quad (4.28)$$

Використання координат перших дифракційних мінімумів дозволяє більш точно виміряти координати одного з мінімумів. Це обумовлено тим, що виміряти з великою точністю координати нульового максимуму (центра дифракційної картини) складно через його велику інтенсивність і ширину. 5. Порівнюємо числові значення теоретично розрахованої просторової частоти першого дифракційного мінімуму $\nu_x = 1/a$ і експериментально триманої частоти ν_{xm} . За формулою (4.24) знаходимо абсолютну похибку $\delta\nu_x$ вимірювання просторової частоти за допомогою КОС.

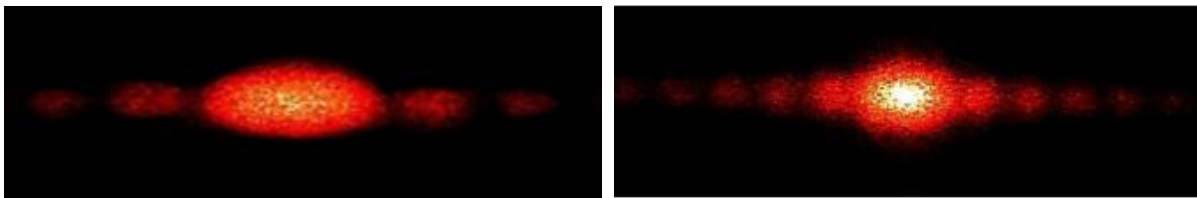


Рисунок 4.7. Дифракційні картини щілини шириною а) 25 мкм; б) 30 мкм, отримані з використанням гелій-неонового лазера ($\lambda = 0,5523$ мкм)

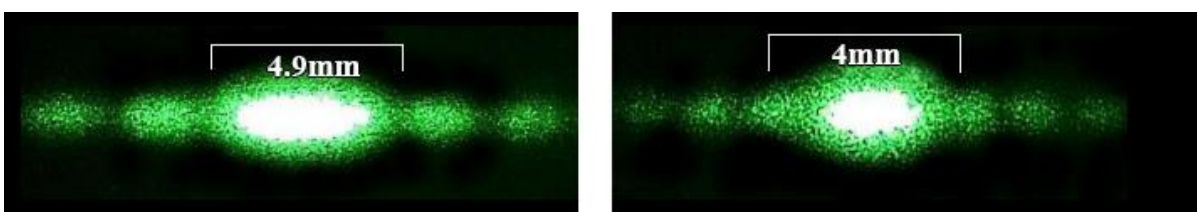


Рисунок 4.7. Дифракційні картини щілини шириною а) 25 мкм; б) 30 мкм, отримані з використанням напівпровідникового лазера ($\lambda = 0,452$ мкм)

ВИСНОВКИ

Проведений огляд сучасного стану проблеми показав, що традиційні методи обробки тепловізійних зображень, хоча й ефективні, мають певні обмеження, особливо щодо швидкості та точності обробки. Сучасні технології вимагають все більш продуктивних і швидкодіючих рішень, особливо у військовому секторі.

Аналіз оптичних методів обробки та фільтрації інформації показав, що ці методи можуть забезпечити значні переваги у швидкості та точності обробки даних. Зокрема, когерентна оптична обробка дозволяє ефективно виконувати паралельні обчислення, що є надзвичайно важливим для роботи з великими масивами даних тепловізійних зображень.

Розглянуто принципи роботи когерентного оптичного процесора, його переваги та недоліки. Виявлено, що використання когерентних методів дозволяє значно підвищити ефективність обробки тепловізійних зображень, забезпечуючи високу точність та швидкодію.

Проаналізовано особливості тепловізійних систем у військовому використанні, що вимагає високої точності та надійності. Виявлено, що когерентні оптичні процесори можуть значно покращити продуктивність тепловізійних систем, зменшуючи час обробки зображень та підвищуючи їх якість.

Проведено аналіз існуючих когерентних оптичних процесорів, їх технічних характеристик та можливостей. Виявлено, що сучасні когерентні процесори мають значний потенціал для використання у різних сферах, включаючи обробку тепловізійних зображень.

Досліджено технічні характеристики сучасних когерентних оптичних процесорів, що дозволило визначити їх основні переваги та недоліки. Встановлено, що ці процесори можуть забезпечити високу швидкість обробки даних, що є критичним для застосування у реальному часі.

Проведено теоретичні та практичні дослідження когерентних оптичних спектроаналізаторів, що є ключовими елементами для реалізації когерентних процесорів. Виявлено основні фактори, що впливають на їх продуктивність та точність.

Експериментальні дослідження підтвердили теоретичні висновки та показали високу ефективність когерентних оптичних спектроаналізаторів для обробки тепловізійних зображень. Отримані результати свідчать про можливість значного покращення характеристик тепловізійних систем за рахунок використання когерентних оптичних процесорів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. L. J. Cutrona, E. N. Leith, C. J. Palermo, et al., "Optical data processing and filtering systems," IRE Transactions on Information Theory, vol. 6, no. 3, pp. 386–400, 1960.
2. E. O'Neill, "Spatial filtering in optics," IRE Transactions on Information Theory, vol. 2, no. 2, pp. 56–65, 1956.
3. Якушенко Ю.Г., Тарасов В. В. Інфрачервоні системи "наглядача" типу. - М.: "Логос", 2004. 430 с.
4. Приходько В.М., Хісамов Р.Ш. Виявлення "точкових" об'єктів тепlopеленгатором на основі матричного фотоприймального пристрою. //Обороннатехніка // Вип. 1-2, 2007. С. 64-66.
5. Алленов М.І. та ін. Стохастична структура випромінювання хмарності. - СПб: Гідрометеовидав, 2000. 175 с.
6. Чупраков А. М., Хитрик А.С. Тепловізійний приціл на основі матричного болометричного приймача. // Оптико-електронні системи візуалізації та обробки оптичних зображень // Вип. 2. - М.: ЦНДІ "Циклон". 2007. С. 60-71.
7. Optics: Phenomena, Materials, Devices, and Characterization: OPTICS 2011: International Conference on Light. AIP Conference Proceedings, Volume 1391. AIP Conference Proceedings, Volume 1391, Issue 1, p.333-335
8. Thomas L. Williams Thermal Imaging Cameras Characteristics and Performance, p. 46
9. Kolobrodov M.S. Influence of the Matrix Structure of the Modulator and Detector on the Optical Spectrum Analyzer Output Signal / V.G. Kolobrodov, G.S. Tymchik, M.S. Kolobrodov, M.M. Lutsiuk // Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia, 2018, Iss. 72, pp. 78–85. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ).
10. Колобродов В.Г., Тимчик Г.С., Колобродов М.С. Когерентні Оптичні Спектроаналізатори

11. <https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.9.021032>
12. <https://optalysys.com/hardware/>
13. https://www.photonics.com/Articles/Optical_Processor_to_Boost_Speed_Reduce_Energy/a57389
14. <https://LightOn.ai>.
15. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering
16. Goodman, J. W. (2005). Introduction to Fourier Optics. Roberts and Company Publishers.
17. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження
18. Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2007). Fundamentals of Photonics. Wiley-Interscience.
19. Hecht, E. (2017). Optics. Pearson Education.
20. Yariv, A., & Yeh, P. (2006). Photonics: Optical Electronics in Modern Communications. Oxford University Press.
21. Born, M., & Wolf, E. (1999). Principles of Optics. Cambridge University Press.
22. Kazovsky, L. G., et al. (1996). Optical Fiber Communication Systems. Artech House.
23. Tkach, R. W., & Chraplyvy, A. R. (1988). Phase noise and linewidth in an optical communications system. Journal of Lightwave Technology, 6(6), 754-760.
24. V. G. Kolobrodov, G. S. Tymchik, Q. A. Nguyen The problems of designing coherent spectrum analyzers
25. Fundamentals of Photonics by Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich
26. Fiber-Optic Communication Systems by Govind P. Agrawal
27. Optical Coherence Tomography: Technology and Applications by Wolfgang Drexler and James G. Fujimoto
28. Optical Coherence and Quantum Optics by Leonard Mandel and Emil Wolf
29. Introduction to Modern Optics by Grant R. Fowles

30. Optical Communications and Networks by Biswanath Mukherjee
31. Optical Fiber Communications by Gerd Keiser
32. Fundamentals of Photonics by Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich
33. Principles of Optics by Max Born and Emil Wolf
34. Scientific articles and reviews from journals such as Applied Optics, Journal of Optical Society of America, and Optics Letters
35. Saleh, Bahaa E. A., and Malvin Carl Teich. "Fundamentals of Photonics." John Wiley & Sons, 2007.
36. Keiser, Gerd. "Optical Fiber Communications." McGraw-Hill, 2010.
37. Born, Max, and Emil Wolf. "Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light." Cambridge University Press, 1999.
38. "Interferometry and Sensing with Coherent Light." Journal of Optical Society of America A, OSA, 2020.
39. "Calibration of Optical Spectrometers." National Institute of Standards and Technology (NIST), NIST, 2013.
40. "Advances in Optical Spectroscopy." Proceedings of the SPIE, SPIE, 2021.
41. Налбандова В.П. Моделювання цифрового когерентного оптичного спектроаналізатора: магістерська дисертація. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 124 с