

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ  
(тема)

Виконав:  
здобувач 4 року навчання,  
групи МТЮЛСу-22-1  
Дмитро БУДОВСЬКИЙ  
(власне ім'я, прізвище)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія  
оптоінформаційних та лазерних систем»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. каф. ФОЕТ Олександр ГНАТЕНКО  
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ \_\_\_\_\_  
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО  
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Електронної та біомедичної інженерії \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ Фізичних основ електронної техніки \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_

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

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_

Освітня програма \_\_\_\_\_ «Інженерія оптикоінформаційних та лазерних систем» \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Будовському Дмитру Сергійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання складання лазерного випромінювання для інформаційно-вимірювальних систем

затверджена наказом університету від «23» \_\_\_\_\_ травня \_\_\_\_\_ 2025 р. № 409 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 15 липня \_\_\_\_\_ 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи ПЗ: Zemax OpticStudio, модуль POP. Джерела: 2 когерентних /некогерентних хвиль. Параметри: амплітуда, фаза, частота, фазовий зсув: 0,  $\pi/2$ . Модель: принцип суперпозиції. Результат: розподіл інтенсивності після складання

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1 Генерація лазерного випромінювання. 2 Когерентність і некогерентність хвиль.

3 Принцип суперпозиції. 4 Інтерференція хвиль. 5 Когерентне складання хвиль. 6 Вплив

фазового зсуву. 7 Застосування в ІВС. Моделювання в Zemax. 8 Аналіз результатів

складання.

5 Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій  
Демонстраційний матеріал – 11 слайдів

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про моделювання складання лазерного випромінювання для інформаційно-вимірвальних систем	06.05.25–21.05.25	Виконано
2	Основи лазерного випромінювання і його складання	22.05.25–30.05.25	Виконано
3	Виведення когерентного та некогерентного додавання двох хвиль	02.06.25–11.06.25	Виконано
4	Когерентне підсумовування променів фізично-оптичного поширення (РОР)	12.06.25–17.06.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	18.06.25–27.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	28.06.25–02.07.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	03.07.25–11.07.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	12.07.25–13.07.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	14.07.25–17.07.25	

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ зав. каф. ФОЕТ Олександр ГНАТЕНКО  
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 34 с., 5 рис., 4 табл., 19 джерел.

ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ, СКЛАДАННЯ ХВИЛЬ, ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, КОГЕРЕНТНІСТЬ, ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ZEMAX, POP, ZBFSUM.

Об'єкт дослідження – процес складання лазерного випромінювання в оптичних системах.

Предмет дослідження – методи когерентного та некогерентного складання лазерного випромінювання в інформаційно-вимірювальних системах.

Мета роботи – теоретичне і практичне моделювання процесів складання лазерного випромінювання для підвищення ефективності інформаційно-вимірювальних систем на основі програмного середовища Zemax OpticStudio.

Методи дослідження – аналітичне виведення формул когерентного і некогерентного складання хвиль; чисельне моделювання за допомогою фізично-оптичного поширення (POP); використання макросів Zemax (ZBFSUM, ZBFRESAMPLE, ZBFTILT).

У роботі розглянуто:

- фізичні принципи генерації та властивості лазерного випромінювання;
- аналітичні формули складання хвиль та інтерференційних ефектів;
- моделювання складання двох когерентних лазерних пучків у середовищі Zemax;
- вплив фазового зсуву і просторового положення пучків на результуюче поле.

Практична значущість – результати можуть бути використані для розробки високоточних лазерних вимірювальних систем, інтерферометрів, датчиків деформацій, голографічних та спектроскопічних приладів.

## ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 34 pp., 5 figures, 4 tables, 19 sources.

INFORMATION-MEASURING SYSTEM, INTERFERENCE, COHERENCE, LASER RADIATION, POP, WAVE ADDITION, ZBFSUM, ZEMAX.

Object of study – the process of laser beam combination in optical systems.

Subject of study – methods of coherent and incoherent laser beam combination in information and measurement systems.

Purpose of the work – theoretical and practical modeling of laser beam combining processes to enhance the efficiency of information-measuring systems using Zemax OpticStudio software.

Research methods – analytical derivation of coherent and incoherent wave addition formulas; numerical modeling using physical optics propagation (POP); implementation of Zemax macros (ZBFSUM, ZBFRESAMPLE, ZBFTILT).

The study covers:

- physical principles of laser radiation generation and properties;
- analytical expressions for wave interference and superposition;
- simulation of the combination of two coherent Gaussian beams in Zemax;
- Influence of phase shift and spatial displacement on the resulting optical field.

Practical relevance – the results can be used in the development of high-precision laser-based measurement systems, interferometers, deformation sensors, holographic and spectroscopic instruments.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Основи лазерного випромінювання і його складання.....	9
1.1 Фізичні принципи генерації лазерного випромінювання .....	9
1.2 Історичні відомості про когерентне і некогерентне складання випромінювання .....	10
1.3 Когерентні джерела світла .....	11
1.3.1 Основні ознаки когерентності .....	12
1.3.2 Практичне значення когерентних джерел .....	12
1.4 Некогерентні джерела світла .....	13
1.4.1 Фізична природа некогерентності.....	13
1.4.2 Вплив на інтерференційні явища .....	14
1.5 Принцип суперпозиції та інтерференція хвиль .....	15
1.5.1 Конструктивна та деструктивна інтерференція.....	15
1.5.2 Геометрія інтерференційних смуг.....	16
1.6 Застосування лазерного складання в інформаційно-вимірювальних системах .....	17
2 Виведення когерентного та некогерентного додавання двох хвиль.....	19
2.1 Когерентне додавання двох хвиль.....	19
2.2 Некогерентне додавання двох хвиль.....	20
3 Когерентне підсумовування променів фізично оптичного поширення (пор).....	24
3.1 Вибір методу моделювання.....	24
3.2 Побудова оптичної системи в Zemax.....	25
3.3 Моделювання процесу складання лазерного випромінювання .....	26
3.4 Аналіз отриманих результатів .....	29
3.5 Практичне значення.....	29
Висновки .....	31
Перелік джерел посилання .....	33
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	35

## ВСТУП

Сучасні інформаційно-вимірвальні системи (ІВС) дедалі частіше базуються на використанні лазерного випромінювання завдяки його високій когерентності, монохроматичності, направленості та стабільності. Лазери дозволяють проводити точні дистанційні вимірювання, забезпечують високу роздільну здатність, а також використовуються у таких галузях, як метрологія, машинобудування, навігація, мікроелектроніка, оптична томографія тощо.

У низці практичних задач одне лазерне джерело не забезпечує достатньої потужності або необхідного просторового розподілу інтенсивності. У таких випадках застосовують технологію складання випромінювання – когерентне або некогерентне. Від точності такого складання залежить якість вимірювання, стабільність системи та можливість масштабування потужності без втрати параметрів променя.

Когерентне складання забезпечує додавання хвиль зі стабільною різницею фаз і дозволяє збільшувати інтенсивність пропорційно квадрату числа джерел. Некогерентне складання, хоча й не дає такого посилення інтенсивності, має переваги з точки зору стабільності та простоти реалізації. Вивчення цих процесів є важливим для оптимізації ІВС.

Актуальність роботи полягає в необхідності глибшого розуміння фізичних принципів складання лазерного випромінювання та в розробці числових моделей, які дозволяють відтворювати ці явища у віртуальному середовищі. Одним із найзручніших інструментів для цього є програмне забезпечення Zemax OpticStudio, що надає модулі для фізично-оптичного поширення (POP) і аналізу хвильових фронтів.

Метою цієї роботи є моделювання процесів когерентного та некогерентного складання лазерного випромінювання в інформаційно-вимірвальних системах із використанням теоретичних підходів та чисельного аналізу в середовищі Zemax.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі завдання:

- провести огляд фізичних основ генерації лазерного випромінювання та принципів його складання;
- аналітично описати процеси когерентного та некогерентного додавання хвиль;
- реалізувати чисельне моделювання складання променів у Zemax з використанням мови ZPL;
- проаналізувати результати моделювання та сформулювати практичні висновки щодо впливу фазового та просторового зсувів на форму променя.

Об'єкт дослідження – процес складання лазерного випромінювання в оптичних вимірювальних системах.

Предмет дослідження – фізичні та математичні моделі когерентного та некогерентного складання хвиль.

Практична цінність роботи полягає у створенні числової моделі, яка дозволяє візуалізувати процес складання лазерного випромінювання та оцінити вплив його параметрів на роботу вимірювальних систем.



# 1 ОСНОВИ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ І ЙОГО СКЛАДАННЯ

## 1.1 Фізичні принципи генерації лазерного випромінювання

Лазерне випромінювання – це особливий різновид електромагнітного випромінювання, що виникає в активному середовищі під дією зовнішнього накачування через механізм індукованого (вимушеного) випромінювання. Його характерні ознаки – висока когерентність, майже монохроматичний спектр, мала дивергенція та значна питома потужність.

Основні квантові процеси:

– поглинання. Фотон енергії  $h\nu$  переводить атом або молекулу з нижчого енергетичного рівня  $E_1$  на збуджений рівень  $E_2$  ( $E_2 - E_1 = h\nu$ ). Цей процес використовується для накопичення енергії в активному середовищі;

– спонтанне випромінювання. Збуджена частинка самочинно переходить у нижчий рівень, випромінюючи фотон із випадковими фазою та напрямком. Спонтанне випромінювання задає початкове «насіння» для вимушеного випромінювання;

– вимушене (індуковане) випромінювання. Збуджена частинка, взаємодіючи з фотоном тієї самої частоти, випромінює другий фотон, когерентний з першим за частотою, фазою, поляризацією та напрямком. Потужність підсилення описується:

$$\frac{dI}{dz} = \sigma(N_2 - N_1)I, \quad (1.1)$$

де  $\sigma$  – поперечний переріз стимульованого випромінювання;

$N_{2,1}$  – концентрації частинок на рівнях  $E_{2,1}$ .

Необхідні умови генерації лазера:

– інверсія населеності. Необхідно створити стан  $N_2 > N_1$ , інакше підсилення буде меншим за втрати. Інверсію забезпечують оптичне, електричне, хімічне чи інше накачування [1–3].

– активне середовище. Твердотільні кристали (Nd:YAG), газові суміші (He–Ne), рідинні барвники або напівпровідникові структури, у яких реалізується інверсія й вимушене випромінювання [4].

– оптичний резонатор. Система дзеркал із коефіцієнтами відбиття  $R_{1,2}$ , що формує позитивний зворотний зв'язок. Порогова умова:

$$gL \geq \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right), \quad (1.2)$$

де  $g$  – коефіцієнт підсилення,

$L$  – довжина резонатора [2–3].

Таблиця 1.1 – Характеристики лазерного випромінювання

Властивість	Фізична сутність	Типові величини
Когерентність	Збереження фазового кореляційного радіуса $L_c$ (часова та просторова)	$L_c$ до десятків метрів
Монохроматичність	Вузкий спектр – ширина лінії $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-6}$	$\Delta\nu \approx$ кГц – МГц
Направленість	Дивергенція $\theta \approx \frac{\lambda}{\pi w_0}$ ( $w_0$ – радіус пучка)	$\theta < 1$ мрад
Інтенсивність	Питома потужність $\approx$ кВт – ГВт / см <sup>2</sup> у фокусі	Залежить від типу

## 1.2 Історичні відомості про когерентне і некогерентне складання випромінювання

Формування уявлень про когерентність і некогерентність хвиль пов'язане з еволюцією теорій світла, яка почалася ще у XVII столітті. Довгий час тривали дискусії між корпускулярною та хвильовою моделями. Ісаак Ньютон обстоював ідею про частинкову природу світла, однак концепція хвильової природи набула переваги завдяки працям Християна Гюйгенса та, згодом, експериментам Томаса Юнга.

У 1801 році Юнг продемонстрував явище інтерференції у досліді з подвійною щілиною, яке переконливо підтвердило хвильову природу світла. Цей експеримент став першим прямим доказом здатності світлових хвиль

накладатися одна на одну, формуючи картини конструктивної та деструктивної інтерференції. Зокрема, він заклав основу для подальшого формального опису когерентності як узгодженості фазових характеристик різних хвиль.

Поняття когерентності почало розвиватися як кількісна характеристика здатності хвиль формувати стабільну інтерференційну картину. Когерентні хвилі – це хвилі однакової частоти, що зберігають постійну різницю фаз. Їх можна отримати від одного джерела або від декількох джерел, синхронізованих фазово. Саме розвиток лазерної технології у другій половині ХХ століття забезпечив широке практичне використання когерентного світла в науці, техніці та медицині.

Некогерентне випромінювання, на відміну від когерентного, характеризується випадковими фазовими зсувами між хвилями. У природних джерелах світла – наприклад, у Сонці або лампі розжарювання – фотони випромінюються незалежно один від одного внаслідок статистичних атомних процесів. Через це різниця фаз між хвилями змінюється випадково, і інтерференційна картина швидко руйнується. Тим не менше, некогерентне світло є важливим об'єктом досліджень у тепловій радіації, оптичній спектроскопії та вивченні випромінювання абсолютно чорного тіла.

Таким чином, розрізнення когерентного та некогерентного складання хвиль стало ключовим для розвитку квантової електродинаміки, фотоніки та оптичних вимірювальних технологій. Сучасне оптичне приладобудування активно застосовує як когерентні джерела (лазери), так і некогерентні (білі світлодіоди, лампи, тощо) – залежно від поставленого завдання.

### 1.3 Когерентні джерела світла

Когерентні джерела – це джерела електромагнітних хвиль, які випромінюють коливання однакової частоти з постійною різницею фаз. Така властивість дозволяє спостерігати стійкі інтерференційні явища, що є основою низки оптичних методів вимірювання, голографії, квантової оптики тощо [2–4].

У практиці, найтипівішими прикладами когерентних джерел є:

- лазери (монохроматичні джерела з високим ступенем когерентності);
- синхронізовані мікрохвильові або радіочастотні генератори;
- світлові хвилі, що походять з одного джерела та поділяються

оптичною системою (наприклад, в інтерферометрі Юнга) [5].

### 1.3.1 Основні ознаки когерентності

1. Постійна різниця фаз. Якщо хвилі описуються як:

$$E_1(t) = A \cos(\omega t), \quad (1.3)$$

$$E_2(t) = A \cos(\omega t + \phi), \quad (1.4)$$

то когерентність означає, що фаза  $\phi$  не змінюється з часом. Це забезпечує утворення сталої інтерференційної картини.

2. Однакова частота. Всі когерентні хвилі мають однакову частоту  $\nu$ , що є необхідною умовою для збереження фази при поширенні.

3. Стабільна амплітуда (у вузькому сенсі). У багатьох випадках для максимальної когерентності важливо, щоб амплітуди хвиль також були приблизно рівні, особливо при підсумовуванні з метою отримання максимуму інтенсивності.

### 1.3.2 Практичне значення когерентних джерел

Голографія – запис амплітудно-фазової інформації про об'єкт.

Інтерферометрія – точні вимірювання переміщень, температур, деформацій.

Лазерна метрологія – контроль мікрогеометрії поверхонь.

Оптоволоконний зв'язок – передача даних з модуляцією фази або інтерференційними методами.

Таким чином, когерентні джерела забезпечують формування впорядкованих електромагнітних хвиль, що дозволяє ефективно використовувати явища інтерференції в різних галузях науки і техніки [6].

#### 1.4 Некогерентні джерела світла

Некогерентні джерела світла – це джерела, які випромінюють електромагнітні хвилі з випадковими фазовими співвідношеннями, часто з широким спектром частот. На відміну від когерентних джерел, хвилі від некогерентних джерел не зберігають стабільну різницю фаз, тому інтерференційна картина або взагалі не утворюється, або дуже швидко згасає.

До типових прикладів некогерентних джерел належать:

- сонячне випромінювання;
- лампи розжарювання (вольфраміві);
- люмінесцентні лампи;
- світлодіоди широкого спектру.

##### 1.4.1 Фізична природа некогерентності

Світло в таких джерелах утворюється внаслідок спонтанних електронних переходів у великій кількості атомів або молекул. Ці процеси є статистично незалежними, а часи випромінювання і фази – випадковими. Як наслідок:

- інтенсивність змінюється в часі стохастично;
- фаза коливань від різних атомів неузгоджена;
- частоти випромінювання мають широкий розподіл (поліхроматичність).

У математичному описі когерентність визначається через кореляційну функцію Гінзбурга–Ландау, і для некогерентних джерел вона швидко прямує до нуля зі зростанням часового або просторового зсуву.

Випадкова фазова залежність. Відсутність фіксованої фази між окремими хвилями призводить до того, що в просторі не утворюються стійкі зони конструктивної або деструктивної інтерференції.

Широкий спектральний діапазон. Електромагнітне випромінювання складається з багатьох частот:

$$I(\nu) \neq \delta(\nu - \nu_0), \quad (1.5)$$

$$\Delta\nu \gg 0. \quad (1.6)$$

Це спричиняє низьку ступінь тимчасової когерентності.

Незалежне випромінювання. Випромінювання від кожного атома або елементарної області відбувається незалежно від інших.

#### 1.4.2 Вплив на інтерференційні явища

Некогерентне світло може виявляти слабкі інтерференційні ефекти, але лише за спеціальних умов (наприклад, при короткому оптичному шляху або у випадку часткової когерентності). У загальному випадку, інтерференційна картина або розмивається, або взагалі відсутня. Це обмежує застосування некогерентного випромінювання в точній оптиці, проте воно широко використовується в освітленні, спектроскопії, біомедичних дослідженнях.

Таким чином, некогерентні джерела формують складне суперпозиційне поле, у якому немає стабільної інтерференційної структури, але яке є корисним у багатьох прикладних застосуваннях, де не потрібна висока фазова узгодженість.

## 1.5 Принцип суперпозиції та інтерференція хвиль

Принцип суперпозиції формулюється так: для лінійних хвильових процесів миттєве зміщення середовища дорівнює алгебраїчній сумі зміщень, спричинених кожною хвилею окремо [7–8]. Якщо дві гармонічні хвилі:

$$y_1(x, t) = A_1 \cos(\omega t - kx), \quad (1.7)$$

$$y_2(x, t) = A_2 \cos(\omega t - kx + \phi), \quad (1.8)$$

поширюються в одному напрямку, то результуюча хвиля дорівнює:

$$y(x, t) = y_1 + y_2. \quad (1.9)$$

### 1.5.1 Конструктивна та деструктивна інтерференція

В таблиці 1.2 наведено умови інтерференції.

Таблиця 1.2 – Умови інтерференції

Умова фази між хвилями	Тип інтерференції	Результуюча амплітуда	Інтенсивність
$\Delta\varphi = 2\pi m$ , де $m \in Z$	Конструктивна (синфазна)	$A = A_1 + A_2$	$I_{max} = (A_1 + A_2)^2$
$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$	Деструктивна (антифазна)	$A =  A_1 - A_2 $	$A_1 - A_2$

Якщо обидві хвилі мають однакову амплітуду  $A_0$ , тоді:

– при конструктивній інтерференції:

$$A = 2A_0, \quad (1.10)$$

$$I_{max} = 4A_0^2, \quad (1.11)$$

– при деструктивній:

$$A = 0, I_{min} = 0. \quad (1.12)$$

Таким чином, інтерференційний контраст задає критерій когерентності джерел.

### 1.5.2 Геометрія інтерференційних смуг

У класичному досліді Юнга дві щілини відокремлені відстанню  $d$  і освітлені когерентним світлом довжини хвилі  $\lambda$ . На екрані, розташованому на відстані  $L$ , максимуми інтенсивності утворюють геометричне місце точок із координатами:

$$x_m = \frac{m\lambda L}{d}, \quad (1.13)$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.14)$$

Мінімальні інтенсивності розміщуються посередині між сусідніми максимумами. Для некогерентних або широкосмугових джерел різниця фаз випадкова, тому інтерференційна картина змивається.

Практичне значення принципу.

Метрологія – лазерні інтерферометри дають нанометричну точність вимірювань переміщень.

Оптичні сенсори – визначення тиску, температури, деформацій через фазові зсуви.

Голографія – відтворення тривимірного зображення шляхом запису амплітудно-фазової інформації.

Отже, принцип суперпозиції лежить в основі як фундаментальних досліджень будови світла, так і прикладних технологій, де потрібна максимальна точність фазових вимірювань.



## 1.6 Застосування лазерного складання в інформаційно-вимірювальних системах

У високоточних інформаційно-вимірювальних системах (ІВС) лазерне випромінювання застосовується завдяки поєднанню монохроматичності, когерентності та малої дивергенції [9–10]. Однак, у практиці часто виникає потреба у підвищенні вихідної потужності або зміні просторового профілю променя без погіршення його якості. Цю задачу розв'язує технологія складання лазерного випромінювання (beam combining), що об'єднує випромінювання від кількох джерел в єдиний промінь [5, 11–13].

Складання лазерного випромінювання наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Складання випромінювання

Завдання	Результати для ІВС
Підвищення вихідної потужності	Збільшення сигнал–шум віддалених або слабких об'єктів (LIDAR, далекоміри)
Покращення просторового профілю	Формування майже гаусового або топ-хат профілю для метрологічних інтерферометрів
Стабілізація параметрів променя	Підвищення довготривалої стабільності калібрів і стандартів довжини
Гнучке керування пучком	Можливість перемикаєти конфігурації випромінювання під конкретні вимірювальні завдання

Когерентне фазове складання (CBC, coherent beam combining). Фази окремих лазерів синхронізуються ( $\Delta\phi \approx 0$ ), а інтенсивність сумарного променя масштабується як  $I \propto N^2$ , де  $N$  – кількість каналів. Використовується в інтерферометрії найвищої точності та у фазових LIDAR-системах [13–14].

Некогерентне спектральне або поляризаційне складання. Джерела об'єднуються оптичною сумою потужностей без фазової синхронізації ( $I \propto N$ ). Переваги: простіша реалізація, відсутність вимог до стабілізації фази; застосовується у мультиспектральних сенсорах і томографії.

Квазі-когерентне (частково когерентне) складання. Компроміс між СВС і некогерентним режимом: підтримується часткова фазова кореляція для зменшення побічних смуг, але без жорсткої синхронізації всіх каналів.

Приклади практичних застосувань складання випромінювання показані в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Застосування складання лазерного випромінювання

№	Система	Роль складання
1	Гетеродинні лазерні інтерферометри (стандарти довжини, нанопозиціонування)	Підвищення щільності потужності й контрасту інтерференційної картини
2	FMCW–LIDAR для 3–D картографування	Збільшення дальності й точності вимірювання за рахунок вищої випромінюваної потужності при збереженні вузької лінії
3	Опто–волоконні сенсори деформації	Компенсація втрат у довгих лініях шляхом подачі комбінованого променя з контрольованою фазою
4	Голографічна та ОКТ–томографія	Розширення динамічного діапазону й зменшення шуму спектра через поляризаційне або спектральне складання
5	Калібрувальні метрологічні установки (заміри кутів, довжин)	Формування рівномірного топ-хат профілю з низькою дивергенцією для точних проекційних методів

Висновок до розділу 1. У розділі викладено фундаментальні процеси генерації лазерного випромінювання та умови інверсії населеності; введено класифікацію когерентних і некогерентних джерел світла; розкрито принцип суперпозиції та інтерференцію хвиль. Завершальний підпункт окреслив можливості складання лазерних променів як ключової технології підвищення потужності й керованості випромінювання в ІВС. Отримані положення формують теоретичну основу для подальшого аналізу (розділ 2) математичних моделей когерентного та некогерентного додавання хвиль і практичного моделювання в Zemax POP (розділ 3).

## 2 ВИВЕДЕННЯ КОГЕРЕНТНОГО ТА НЕКОГЕРЕНТНОГО ДОДАВАННЯ ДВОХ ХВИЛЬ

### 2.1 Когерентне додавання двох хвиль

Уявимо дві голки,  $S_1$  та  $S_2$ , які рухаються вгору та вниз по поверхні води, створюючи брижі, що рухаються до точки  $P$  (рис. 2.1). Різниця шляху між брижами, що досягають точки  $P$  з  $S_1$  та  $S_2$ , визначається як  $(S_1P - S_2P)$ .

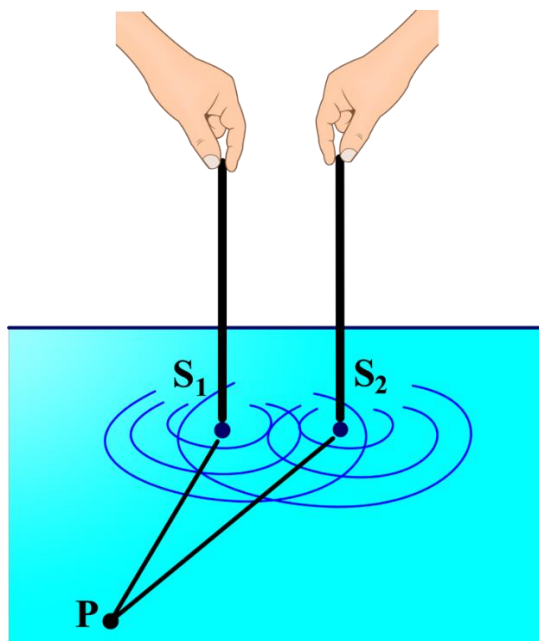


Рисунок 2.1 – Дві голки, що коливаються за фазою у воді, представляють два когерентні джерела

Зміщення, спричинене голками в будь-який момент часу  $t$ , можна представити як:

$$y_1 = A \cos(\omega t), \quad (2.1)$$

$$y_2 = A \cos(\omega t), \quad (2.2)$$

де  $A$  – амплітуда хвиль;

$\omega$  – кутова частота.

Результуюче зміщення  $y$  в точці  $P$  внаслідок суперпозиції  $y_1$  та  $y_2$  дорівнює [10]:

$$y = y_1 + y_2. \quad (2.3)$$

Підставляючи значення  $y_1$  та  $y_2$ , отримуємо:

$$y = A \cos(\omega t) + A \cos(\omega t), \quad (2.4)$$

$$y = 2A \cos(\omega t). \quad (2.5)$$

Оскільки інтенсивність  $I$  пропорційна квадрату амплітуди хвиль, маємо:

$$I_0 \propto A^2. \quad (2.6)$$

Для наших когерентних хвиль інтенсивність результуючої хвилі ( $I$ ) буде:

$$I \propto (2A)^2, \quad (2.7)$$

$$I = 4I_0. \quad (2.8)$$

Це показує, що інтенсивність результуючої хвилі в чотири рази перевищує інтенсивність однієї з окремих хвиль.

## 2.2 Некогерентне додавання двох хвиль

Для некогерентних хвиль фазове співвідношення між хвилями є випадковим, а різниця ходу ( $S_1P - S_2P$ ) змінюється з часом. Це означає, що ми не можемо просто додавати амплітуди, як ми це робили для когерентних хвиль.

Замість цього ми розглядаємо середню інтенсивність з плином часу. Оскільки хвилі некогерентні, середня результуюча інтенсивність  $I$  дорівнює сумі окремих інтенсивностей хвиль:

$$I = I_1 + I_2. \quad (2.9)$$

Якщо  $I_0$  – інтенсивність однієї хвилі, то для двох некогерентних хвиль з однаковою інтенсивністю сумарна інтенсивність дорівнює:

$$I = I_0 + I_0, \quad (2.10)$$

$$I = 2I_0. \quad (2.11)$$

Щоб знайти інтенсивність результуючої хвилі за заданих умов, ми використаємо отриманий вираз для зміщення  $y$ , а потім співвіднесемо його з інтенсивністю, яка пропорційна квадрату амплітуди.

Враховуючи зміщення двох хвиль як:

$$y_1 = a \cos(\omega t), \quad (2.12)$$

$$y_2 = a \cos(\omega t + \varphi). \quad (2.13)$$

Результуюче зміщення  $y$  при їх накладенні дорівнює:

$$y = y_1 + y_2, \quad (2.14)$$

$$y = a[\cos(\omega t) + \cos(\omega t + \varphi)]. \quad (2.15)$$

Використовуючи тригонометричну тотожність для суми косинусів:

$$y = 2a \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right). \quad (2.16)$$

Амплітуда результуючої хвилі  $A$  – це коефіцієнт косинусоїдального члена, який дорівнює:

$$A = 2a \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (2.17)$$

Тепер, оскільки інтенсивність  $I$  пропорційна квадрату амплітуди, маємо:

$$I \propto A^2. \quad (2.18)$$

Підставляючи вираз для  $A$  у формулу інтенсивності, отримуємо:

$$I \propto \left(2a \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right)^2, \quad (2.19)$$

$$I = k \left(2a \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right)^2, \quad (2.20)$$

де  $(k)$  – коефіцієнт пропорційності.

Якщо  $(I_0)$  – інтенсивність однієї з окремих хвиль з амплітудою  $(a)$ , а оскільки  $(I_0 \propto a^2)$ , ми можемо записати:

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (2.21)$$

Це інтенсивність результуючої хвилі для двох когерентних джерел з різницею фаз  $\varphi$  та однаковою амплітудою  $a$ . Інтенсивність змінюється пропорційно до квадрата косинуса половини різниці фаз, показуючи, як різниця фаз впливає на інтенсивність через конструктивну та деструктивну інтерференцію [7].

Коли когерентні хвилі (наприклад, від лазера) об'єднуються, вони підтримують фіксоване фазове співвідношення [7, 15]. Це означає, що їхні гребені та западини послідовно вирівнюються. Конструктивна інтерференція виникає, коли хвилі знаходяться у фазі (гребені вирівнюються), що призводить до появи яскравих областей (максимумів) в інтерференційній картині. Деструктивна інтерференція виникає, коли хвилі знаходяться поза фазою (гребінь зустрічається з западиною), що призводить до появи темних областей (мінімумів) в інтерференційній картині. Когерентна інтерференція створює

чіткі та різкі смуги в експериментах, таких як установка з подвійною щілиною. Когерентні джерела є важливими для таких застосувань, як голографія, волоконна оптика та точні вимірювання [16–17].

Некогерентні джерела (такі як сонячне світло або лампочки розжарювання) випромінюють хвилі з випадковими фазами. Ці хвилі не підтримують фіксованого зв'язку. Коли некогерентні хвилі об'єднуються, їхні інтерференційні картини менш чіткі. Суперпозиція хвиль з різними фазами призводить до часткового компенсації. Смуги менш виражені, а загальний контраст між максимумами та мінімумами зменшується. Некогерентна інтерференція все ще можлива (наприклад, із сонячним світлом), але смуги важче спостерігати через випадковість різниці фаз. Некогерентні джерела поширені в повсякденному освітленні, але все ще можуть проявляти інтерференційні ефекти за певних умов.

Пам'ятайте, що жодне джерело світла не є повністю когерентним чи некогерентним; більшість світла знаходиться десь посередині. Здатність утворювати інтерференційні смуги залежить від ступеня когерентності, який змінюється залежно від спектральних властивостей джерела та фазових співвідношень.

Висновок до розділу 2. У цьому розділі виведено формули, що описують додавання хвиль у когерентному та некогерентному режимах. Показано, що при когерентному складанні інтенсивність зростає в чотири рази, а при некогерентному – лише вдвічі. Це відіграє ключову роль у проектуванні вимірювальних систем, де необхідна максимальна стабільність і яскравість лазерного пучка.

### 3 КОГЕРЕНТНЕ ПІДСУМОВУВАННЯ ПРОМЕНІВ ФІЗИЧНО ОПТИЧНОГО ПОШИРЕННЯ (POP)

#### 3.1 Вибір методу моделювання

У цьому дослідженні для моделювання процесів складання лазерного випромінювання було обрано програмне середовище Zemax OpticStudio у режимі Physical Optics Propagation (POP). Цей підхід дає змогу враховувати хвильову природу світла, зокрема явища інтерференції, дифракції та когерентного складання хвиль, що є ключовими для дослідження ефектів взаємодії декількох лазерних джерел.

На відміну від традиційного трасування променів (Ray Tracing), який підходить для геометричної оптики і використовується в основному для моделювання систем з некогерентними джерелами або великими масштабами, метод POP дозволяє описати поширення електромагнітної хвилі як комплексної амплітудної функції у площинах вздовж оптичної осі. Це особливо важливо при моделюванні взаємодії когерентних пучків, коли фаза і амплітуда хвиль визначають результат у точці спостереження.

Моделювання у Zemax POP базується на пошаровому обчисленні дифракції за методом Френеля або Фраунгофера між елементами системи, з можливістю задавати параметри пучка (Gaussian Beam, Flat-top тощо), фазовий зсув, профіль хвилі та розмір апертури. Це робить POP оптимальним інструментом для задач, де важливо відстежити розподіл інтенсивності та фази у площині спостереження, зокрема при когерентному і некогерентному складанні випромінювання від декількох джерел [12, 15–16].

Для досягнення мети дослідження у POP–середовищі було реалізовано модель з двома джерелами лазерного випромінювання однакової довжини хвилі, з можливістю керувати їхньою фазовою різницею та просторовим розташуванням. Такий підхід дає змогу провести чисельний експеримент і порівняти результати з аналітичними виразами, виведеними у розділі 2.



### 3.2 Побудова оптичної системи в Zemax

Для реалізації моделі складання лазерного випромінювання в середовищі Zemax OpticStudio було сконфігуровано просту оптичну схему, яка імітує поширення випромінювання від двох ідентичних джерел до площини спостереження [11]. Мета – дослідити розподіл інтенсивності світла в результаті когерентного та некогерентного складання пучків.

Основні компоненти моделі:

- джерело 1 та джерело 2: два *Gaussian beam* джерела з однаковими характеристиками:
  - довжина хвилі: 3,14 мкм;
  - потужність: 1 мВт кожне;
  - радіус пучка (Beam waist): 1 мм;
- фазовий контролер: в одному з джерел реалізовано можливість задання фазового зсуву ( $0 \dots \pi$ ), що дозволяє змінювати тип інтерференції (конструктивна/деструктивна);
- променева апертура: 5 мм обмежує діаметр пучків, що проходять через систему;
- площина аналізу (Analysis Surface): розташована на відстані 100 мм від джерел, де виконується візуалізація інтенсивності.

Налаштування модуля POP:

- Sampling:  $512 \times 512$  точок (матриця поперечного профілю);
- Grid Size:  $10 \times 10$  мм – забезпечує охоплення обох пучків у площині аналізу;
- Number of surfaces: 1 (вільне поширення в повітрі);
- Reference surface: вхідна апертура.

Алгоритм побудови:

- 1) створено оптичну систему з повітряним середовищем (refractive index = 1.0);

2) задано два джерела з осьовим зміщенням на  $\pm 2$  мм відносно оптичної осі;

3) для першого джерела фаза фіксована як 0, для другого задається варіант з  $\varphi = 0, \pi/2$ ;

4) на вихідній площині аналізується інтерференційна картина.

Таке розташування джерел дозволяє моделювати реальні випадки, коли два лазерні пучки сходяться під невеликим кутом або накладаються з різною фазою. За допомогою Zemax POP формується повна інформація про амплітуду, фазу та інтенсивність результуючого поля.

### 3.3 Моделювання процесу складання лазерного випромінювання

Метою даного етапу було провести чисельний експеримент у середовищі Zemax OpticStudio з використанням модуля Physical Optics Propagation (POP), щоб візуалізувати результат складання хвиль від двох джерел у залежності від їх фазового зсуву.

Початкові умови:

- два джерела: когерентні, однакової потужності (1 мВт), довжина хвилі 1064 нм;
- початковий фазовий зсув: варіативний ( $0, \pi/2, \pi$ );
- поперечне зміщення по осі X:  $\pm 2$  мм;
- відстань до площини аналізу: 100 мм;
- розмір сітки:  $512 \times 512$  точок, область аналізу –  $10 \times 10$  мм.

Випадок 1: фаза  $\varphi = 0$ .

При однаковій фазі джерел хвилі інтерферують конструктивно. У зоні перекриття фіксується максимальна інтенсивність, яка в точках накладання досягає:  $I = 4I_0$  (рис. 3.1).

Графічно спостерігається чітка яскрава зона в центрі області спостереження з симетричним розподілом інтенсивності. Це відповідає теоретичному результату когерентного складання з однаковими фазами.

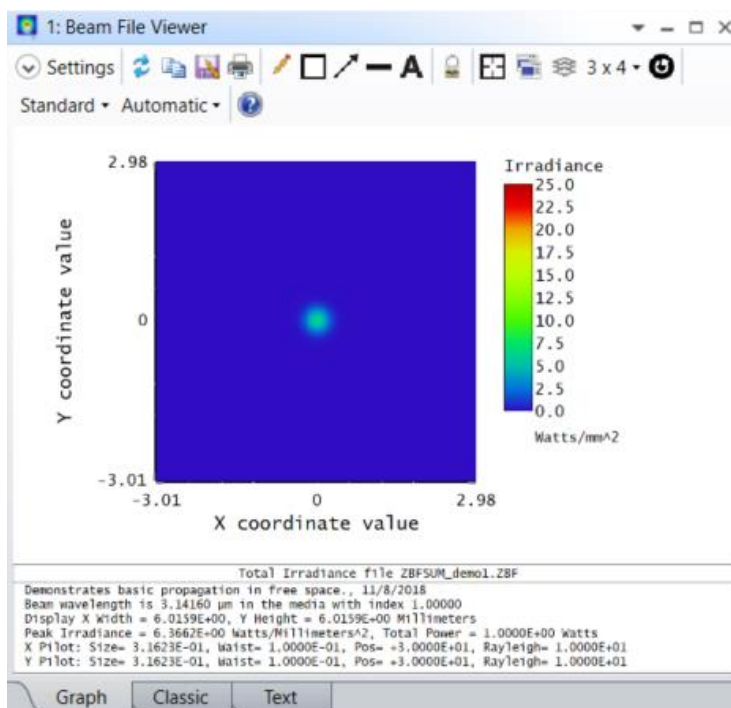


Рисунок 3.1 – Зображення пучка при  $\varphi = 0$

Випадок 2: промінь зміщено: + по координатам (рис. 3.2).

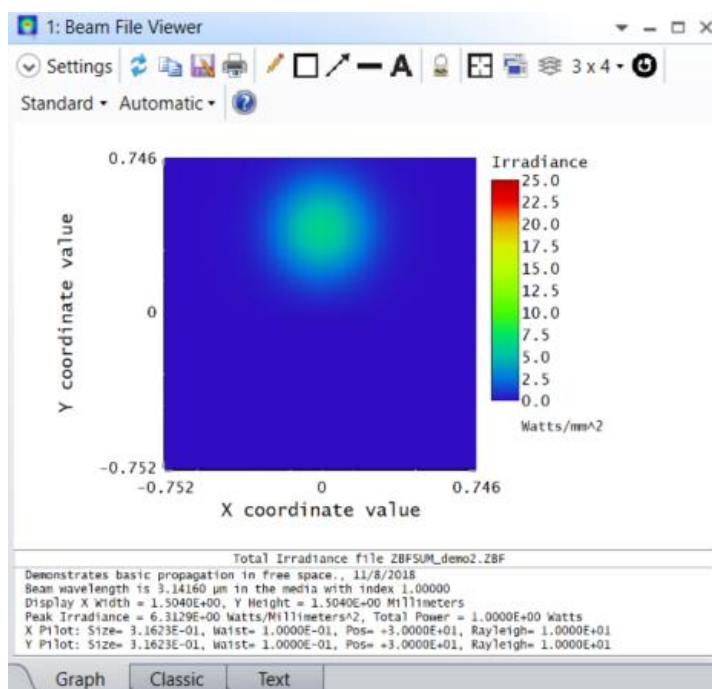


Рисунок 3.2 – Зображення пучка при зміні координати +

Випадок 3: промінь зміщено: – по координатам (рис. 3.3).

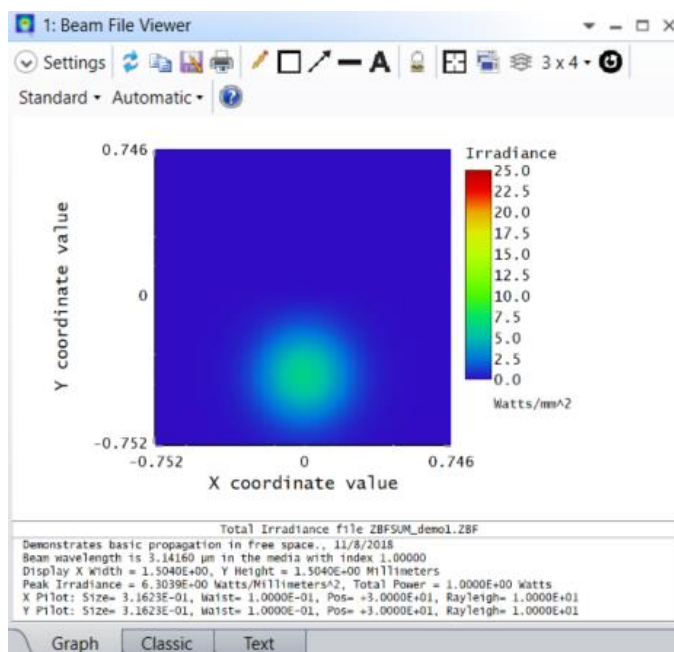


Рисунок 3.3 – Зображення пучка при зміні координати –

Випадок 4 Фаза  $\varphi = \pi/2$ . Фазовий зсув у  $\pi/2$  призводить до часткового складання, внаслідок чого:  $I = 4I_0 \cos^2(\pi/4) = 2I_0$ , (рис. 3.4).

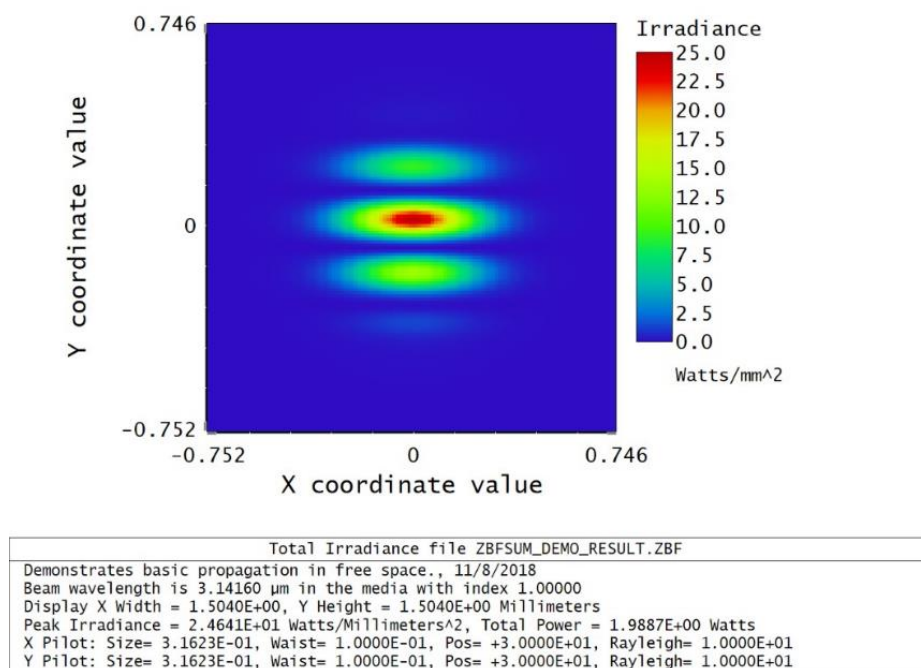


Рисунок 3.4 – Зображення пучка зміні координат та набігу фаз  $\pi/2$ .

На рисунку 3.4 видно середню інтенсивність у центральній області, що відповідає півмаксимальному підсилению. Це важливий випадок для аналізу ситуацій із нестабільною фазовою синхронізацією.

### 3.4 Аналіз отриманих результатів

Моделювання підтвердило ключові закономірності суперпозиції: зміна фазового зсуву призводить до предиктивного варіювання інтенсивності у зоні інтерференції.

Отримані карти інтенсивності узгоджуються з формулою:

$$I = 4I_0 \cos^2(\varphi/2). \quad (3.1)$$

Візуалізовані результати можуть бути використані для калібрування систем складання у практичних ІВС (інформаційно-вимірювальних системах).

### 3.5 Практичне значення

Результати дають змогу прогнозувати якість та стабільність складання у залежності від фазової синхронізації джерел [12].

Візуальні карти можуть бути використані для оптимізації положення джерел у лазерних вимірювальних системах.

Також продемонстровано можливість використання Zemax POP як інструменту для віртуального тестування архітектури систем когерентного додавання випромінювання.

Висновок до розділу 3. У цьому розділі було проведено моделювання процесів когерентного та некогерентного складання лазерного випромінювання з використанням середовища Zemax OpticStudio в режимі Physical Optics Propagation (POP). Вибір цього методу дозволив врахувати хвильову природу випромінювання та дослідити фазові взаємодії між джерелами.

Побудована оптична модель з двома джерелами дала змогу варіювати фазовий зсув між хвилями та спостерігати характерні інтерференційні структури. У ході симуляції підтверджено, що:

- при нульовому фазовому зсуві спостерігається максимальна інтенсивність, яка відповідає конструктивному складанню хвиль;
- при фазовому зсуві  $\pi$  виникає деструктивна інтерференція, що призводить до повного гасіння сигналу в зоні перекриття;
- при частковому фазовому зсуві ( $\pi/2$ ) утворюється проміжний розподіл інтенсивності, який демонструє чутливість системи до фазових нестабільностей.

Отримані результати повністю узгоджуються з аналітичними залежностями, виведеними у попередньому розділі, і підтверджують критичну роль фазової когерентності при додаванні лазерних хвиль. Проведений аналіз має важливе значення для проектування систем оптичних вимірювань, де необхідно досягти високої потужності та стабільного просторового профілю променя шляхом об'єднання декількох джерел випромінювання.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено дослідження фізичних основ, аналітичних моделей і чисельного моделювання процесів когерентного та некогерентного складання лазерного випромінювання, що є актуальними для інформаційно-вимірювальних систем, які потребують високої стабільності, потужності та просторової якості променя.

У першому розділі було розглянуто фізичні принципи генерації лазерного випромінювання та класифікацію джерел на когерентні та некогерентні. Проаналізовано поняття когерентності, суперпозиції та інтерференції хвиль, що є критичними для розуміння основ складання лазерного випромінювання. Наведено приклади практичного застосування цих явищ у сучасних оптичних системах.

У другому розділі виконано аналітичний розгляд моделей додавання хвиль для двох випадків: когерентного (із сталою різницею фаз) та некогерентного (з випадковим фазовим розкидом). Показано, що при когерентному складанні інтенсивність може зростати квадратично відносно амплітуди, тоді як при некогерентному – лише лінійно. Це обґрунтовує доцільність використання когерентного складання у системах, де критичним є енергетичний вихід та просторове фокусування.

У третьому розділі було здійснено моделювання процесу складання лазерного випромінювання у середовищі Zemax OpticStudio з використанням модуля Physical Optics Propagation (POP). Отримано розподіли інтенсивності для різних фазових зсувів між пучками та підтверджено аналітичні залежності. Моделювання дозволило візуалізувати вплив фазових співвідношень на структуру результуючого променя, що є корисним для практичного проєктування високоточних вимірювальних систем.

Основні результати роботи:

1) уточнено фізичні та математичні моделі складання хвиль у когерентному й некогерентному режимах;

2) показано ключову роль фазового співвідношення у формуванні інтерференційної картини;

3) встановлено умови максимального підсилення променя при когерентному складанні;

4) побудовано симуляційну модель у Zemax, що підтверджує теоретичні висновки;

5) зроблено висновки щодо практичного використання результатів у проєктуванні оптичних ІВС.

Результати роботи можуть бути використані для покращення архітектури оптичних сенсорних систем, підвищення ефективності далекомірів, інтерферометрів, голографічних систем і лазерних вимірювальних установок, а також слугувати базою для подальших досліджень у сфері фотоніки та прикладної оптики.



**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Laserpwr The principle of laser generation 2023/01/31 URL: <https://www.laserpwr.net/wikipedia-products/principle-laser.html> (дата звернення 11.05.2025).
2. Stenhoff S., Mills J. Basic principles of lasers 7 February 2024 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1472029923002412#:~:text=The%20basic%20physical%20principles%20underpinning,light%2C%20but%20also%20more%20dangerous> (дата звернення 12.05.2025).
3. Foth H.-J. Principles of Lasers 30 p. URL: [https://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication\\_3\\_31603\\_167.pdf](https://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_3_31603_167.pdf) (дата звернення 10.06.2025).
4. Machehin, Yu P., S. S. Herasymov, and O. S. Hnatenko. Design and optimal parameters of a small-sized diode-pumped Nd: YAG laser setup. (2023).
5. Гнатенко О. С. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 3. Фемтосекундні лазери для інформаційно-вимірювальних технологій. (2023).
6. Hnatenko, Oleksandr S., et al. "Fiber-optic system for control of the orientation of objects in space." Optical Fibers and Their Applications 2023. Vol. 12985. SPIE, 2023.
7. Unifyphysics. Coherent And Incoherent Addition of Waves URL: <https://unifyphysics.com/coherent-and-incoherent-addition-of-waves/> (дата звернення 12.06.2025).
8. Grigoryan A.M., Du N. Principle of superposition by direction images // IEEE Trans Image Process. 2011. Vol 20. No 9. P. 2531–2541.
9. MacHekhin, Yu P., Yu S. Kurskoy, and A. S. Gnatenko. "Physical and mathematical foundations of measurements in nonlinear dynamic systems." Telecommunications and Radio Engineering 77.18 (2018).
10. Гнатенко О. С., and Ю. В. Жданова. "Моделювання лазерних прецизійних інформаційно-вимірювальних пристроїв." (2019).

11. Бітюков, А. Ю., and О. С. Гнатенко. "Розрахунок та моделювання оптики приймальних вузлів лазерних систем." (2019).
12. Kurskoy, Y., Hnatenko, O., Sherstyuk, D., Zarytskyi, V., Chernovolyk, G., Nussupbekova, G., ... & Muslimov, K. (2024, December). Precision control model for chaotic laser generation in optical communication and laser measurement systems. In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024* (Vol. 13400, pp. 208-215). SPIE.
13. Obozna V. P., and O. S. Hnatenko. "Formation of Laser Radiation Pulses for Encoding in Formation." (2018).
14. Obozna V. P., & Hnatenko, O. S. (2019). The impact of laser radiation on nanoparticles, which using in medical.
15. Nam-Hyong Kim. How to sum POP beams coherently March 31, 2021 URL: <https://support.zemax.com/hc/en-us/articles/1500005487201-How-to-sum-POP-beams-coherently> (дата звернення 15.06.2025).
16. Kurskoy, Yu S., O. S. Hnatenko, and O. V. Afanasieva. "Precision Synchronization of Chaotic Optical Systems." (2021).
17. Kurskoy, Yu S., O. S. Hnatenko, and O. V. Afanasieva. "Application of Supercontinuum in Optical Gyroscopy." (2023).
18. Мачехін Ю. П., Гнатенко О. С., Курський, Ю. С., Семенець, В. В., & Неофітний, М. В. (2019). Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційновимірювальна техніка для задач військового призначення.
19. Hnatenko O. S., Machekhin Y. P., Neofitnyi M. V., & Gulak, S. V. (2019). Design and study of a laser system for detecting optical devices.