

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.37

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій
к.т.н., доц. Нікітчук Т.М.

« 13 » 12 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Дослідження оптико-електронного нахиломіра»

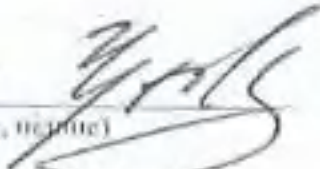
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр.ТРМ-20-1

13.12.2021 
(дата, підпис)

Шикера А.С.

Керівник роботи
к.т.н., доц.

13.12.2021 
(дата, підпис)

Чухов В.В.

Житомир
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему «Дослідження оптико-електронного нахиломіра»

Виконав: студент 2 курсу,
групи ТРм-20-1 спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

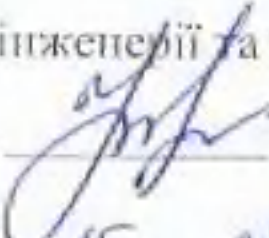
Шикера А.С.

Керівник Чухов В.В.

Рецензент Дубина О.Ф.

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

 Т.М. Нікітчук

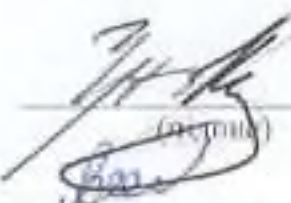
«15» січня 2021 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Шикера Андрій Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження оптико-електронного нахиломіра»
- затверджено наказом по університету від «08» 11 2021 р. № 546-с
2. Мета дослідження: аналіз можливостей оптико-електронних нахиломірів різного принципу дії з вибором точного з них
3. Вихідні дані(характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.): розглянути, як варіант, поворотне дзеркало, призму; дослідити можливість використання методу набігу фази, повороту площини поляризації
4. Основні задачі дослідження: аналіз літературних джерел, розробка математичної моделі об'єкта дослідження, аналіз його точісних можливостей
5. Термін подання роботи до захисту грудень 2021 р.
6. Дата видачі завдання «15» січня 2021 р.

Науковий керівник
Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

Чухов В.В.
(прізвище, ініціали)
Шикера А.С.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

У цій роботі досліджено оптико-електронного нахиломіра на основі циклічного інтерферометра із чотирма дзеркалами. Для вимірювання фази був застосований метод зсуву фази за допомогою поляризації для підвищення чутливості та точності вимірювання.

Дослідження проводилося на основі математичної моделі, що була розроблена та моделювання в спеціалізованому пакеті прикладних програм.

ANNOTATION

In this work, an optoelectronic inclinometer based on a cyclic interferometer with four mirrors is investigated. To measure the phase, the method of phase shift by means of polarization was used to increase the sensitivity and accuracy of the measurement.

The research was conducted on the basis of a mathematical model that was developed and simulated in a specialized application package.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота складається із трьох розділів, які викладено на 64 сторінках і які містять 4 таблиці, 47 ілюстрацій та 28 посилань на літературні джерела.

Ключові слова: зсув фаз, нахиломір;

Перший розділ містить аналіз літературних джерел. Цей аналіз дозволяє оцінити стан розвитку галузі, де застосовується досліджуваний пристрій прилад, що розробляється. Приведено аналіз принципів побудови існуючих приладів.

Другий розділ містить розробку моделі досліджуваного пристрою, яка дозволить провести дослідження характеристик приладу, що досліджується.

Третій розділ містить результати дослідження характеристик оптичного нахиломіра. Це дослідження проводяться на основі розробленої у другому розділі моделі, що розроблена в другому розділі.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
Розділ 1. Огляд та аналіз відомих методів та засобів вимірювання кутів.....	8
1.1 Огляд оптичних методів вимірювання нахилу.....	9
1.2 Оптична інтерферометрія, що використовується для вимірювання малих кутів нахилу.....	9
1.3 Вимірювання нахилу за допомогою інтерферометра Майкельсона.....	10
1.4 Вимірювання нахилу за допомогою інтерферометра циклічного шляху.....	14
1.5 Вимірювання нахилу за допомогою інтерферометра Мурті.....	15
1.6 Вимірювання нахилу за допомогою еталону Фабрі-Перо.....	16
Розділ 2. Теоретичні дослідження властивостей оптичного нахиломіра.....	19
2.1 Розробка математичної моделі роботи оптичного кутоміра.....	19
2.2 Метод відстеження краю.....	24
2.3 Метод перетворення Фур'є	24
2.4 Метод фазового зсуву.....	25
2.5 Чотирикроковий алгоритм із постійною видимістю.....	26
2.6 Метод фазової диференціації з постійною видимістю.....	28
2.7 Метод фазової диференціації зі змінною видимістю.....	30
Розділ 3. Дослідження параметрів оптичного нахиломіра.....	33
3.1 Кількісне вимірювання нахилу на нанорозмірі за допомогою чотирифазного ступінчастого методу.....	39
3.2 Кількісне вимірювання за допомогою методу диференціювання країв....	46
Висновки.....	61
Список використаної літератури.....	62

ВСТУП

Високоточні вимірювання кута нахилу або нахилу потрібні для різноманітних інженерних та наукових застосувань. Зазвичай використовується оптична інтерферометрія, оскільки вона безконтактна і може вимірювати нахил з дуже високим ступенем точності.

Дослідженням реалізації такого принципу побудови нахиломіра і присвячена дана робота.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання кутів нахилу поверхні.

Предметом дослідження є оптичний пристрій вимірювання кута нахилу.

Мета дослідження – визначення властивостей оптичного нахиломіра.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі та виконати наступні роботи:

1. Провести аналіз літературних джерел та визначити основні методи вимірювання кута нахилу поверхні та їх переваги та недоліки.
2. Провести розробку математичної моделі роботи оптичного нахиломіра.
3. Провести дослідження характеристик оптичного нахиломіра.

Практичні результати:

1. Розроблено математичний апарат моделювання оптичного нахиломіра.
2. Проведено дослідження точності вимірювань нахиломіра, що працює на основі алгоритму зсуву фази.

Апробація роботи: тези доповідей на IV Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інформаційно-комп'ютерні технології: стан, досягнення та перспективи розвитку» (Житомир, 25 – 26 листопада 2021 р.).

Розділ 1

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

Високоточні вимірювання нахилу в масштабі тисяч дугових секунд або нанорадіанів часто використовуються в різних галузях науки та техніки, включаючи метрологію для точних вимірювань автоколімації та площинності. Вимірювання нахилу має різноманітні застосування, наприклад, для контролю прямолінійності трансляційних ступенів рентгенівських інтерферометрів [1], для контролю кута між дзеркалами в інтерферометричних телескопах, що використовуються для астрометрії [2], для вимірювання гравітаційної постійної або сили Казимира [3], для вимірювання відхилення консолі в атомно-силових мікроскопах [4] та для вимірювання кутових прискорень [5]. Хоча вимірювання нахилу є механічною проблемою, часто використовуються оптичні методи.

Інтерферометрія — це високочутлива оптична методика вимірювання нахилу, яка використовує принцип інтерференції двох променів, створених одним і тим же лазером, який проходить дещо різні довжини оптичного шляху, коли виникає кутове зміщення.

Інтерферометр Майкельсона є приладом, який широко використовується для вимірювання нахилу з високою точністю і чутливістю [6]. Еталон Фабрі-Перо разом із скануванням також використовувався для вимірювання нахилу з високою точністю [7].

Іншим інтерферометричним методом є пластина зсуву Мерті, яка вимірює нахил шляхом визначення нахилу хвильового фронту після проходження через пластину зсуву [8]. Крім того, гетеродинні методи в інтерферометрії були використані для вимірювання малих нахилів у системах [9].

Зовсім недавно для вимірювання малих кутів нахилу був використаний новий метод із використанням інтерферометра циклічного бічного зсуву. У цій установці, коли інтерферометр обертається, різниця фаз вводиться між

двома поперечними зсувними променями, які потім використовуються для вимірювання обертання [10]. Були виміряні кути від 22 дугових секунд.

З іншого боку, множинні відбиття були використані в метрології для підвищення чутливості інтерферометрів Майкельсона для вимірювання малих лінійних зміщень [11]. Концепція багаторазового відображення була включена в циклічний інтерферометр для покращення чутливості до вимірювання нахилу. Інтерферометр циклічного тракту з його зустрічними променями, що поширюються, не чутливий до лінійного зміщення, але було показано, що він чутливий до нахилу. У порівнянні з інтерферометром Майкельсона, циклічний інтерферометр удвічі чутливіший при вимірюванні нахилу. Показано, що циклічний інтерферометр із множинними відбиттями можна використовувати для вимірювання кутів нахилу нижче 5 мкрад [10].

1.1 Огляд оптичних методів вимірювання нахилу

Для вимірювання кутового нахилу або повороту можна використовувати як інтерферометричні, так і неінтерферометричні методи. Розглянемо інтерферометричні методи, оскільки вони є надійними і можуть використовуватися для вимірювання невеликого нахилу, необхідного в багатьох галузях промисловості.

1.2 Оптична інтерферометрія, що використовується для вимірювання малих кутів нахилу

Коли дві або більше хвиль, створених одним і тим же когерентним джерелом, сходяться, вони будуть заважати одна одній. Це втручання може бути конструктивним або деструктивним: вони підсиляться в місці, де пік однієї хвилі збігається з піками іншої. Там, де пік однієї хвилі попадає на дно іншої хвилі, вони компенсують один одного (або частково скасовуються, якщо амплітуди не рівні). Це називається деструктивне втручання.

Якщо інтерференція включає дві однакові хвилі, з однаковою амплітудою і довжиною хвилі, то хвилі будуть мати конструктивну інтерференцію в певній точці, якщо їх довжини шляху до цієї точки однакові

або відрізняються на цілу кількість довжин хвиль. Для того, щоб хвилі зазнавали деструктивної інтерференції, їх довжини шляху повинні відрізнятися на цілу кількість довжин хвиль плюс половину довжини хвилі [12].

Оптична інтерферометрія використовується для дослідження якості оптичних елементів, таких як дзеркала, лінзи тощо. Вона шукає та вимірює будь-яку деформацію на поверхні оптичного елемента. Щоб оцінити ці оптичні елементи, необхідні високоточні вимірювання в інтерферометричному процесі. Існує кілька інтерферометрів, що використовуються для вимірювання малокутових нахилів у системах, включаючи інтерферометри Майкельсона, гетеродин та циклічні інтерферометри [13, 9, 10]. Також існує кілька методик, які засновані на інтерферометричних процесах. В одному з таких методів використовується пластина зсуву Мурті [8], а в іншому використовується еталон Фабрі-Перо для вимірювання малокутових нахилів у системі [7].

1.3 Вимірювання нахилу за допомогою інтерферометра Майкельсона

Інтерферометр Майкельсона є загальною конфігурацією для оптичної інтерферометрії і був винайдений Альбертом Абрахамом Майкельсоном. Розділювач променів (BS) використовується для поділу світла на два промені, ортогональні один одному. Ці два промені потім відбиваються назад до BS через два дзеркала, де вони потім об'єднуються, утворюючи один промінь. Амплітуди двох променів поєднуюватимуться на основі принципів інтерферометрії, що спричиняє конструктивні або деструктивні завади. Інтерферований промінь направляється на екран, ПЗС-камеру або інший тип детектора для проведення спостереження [6].

Вимірювання нахилу ґрунтовано на вимірюванні різниці оптичного шляху (d) між двома променями, якщо одне з дзеркал нахилено на α в інтерферометрі Майкельсона. Якщо D — відстань дзеркала, нахиленого до екрана, то:

$$\alpha = d/D, \quad (1.1)$$

Недоліком цієї системи є її обмежена роздільна здатність. Для вимірювання малих кутів необхідна велика відстань D між дзеркалом і екраном або ПЗС-камерою [6].

Вимірювання нахилу за допомогою гетеродинного інтерферометра

Оригінальний гетеродинний інтерферометр, показаний на рисунку 1.1, використовується для вимірювання лінійного зміщення. У цьому схематичному розташуванні два колінеарні та ортогонально поляризовані промені з різними кутовими частотами (ω_1 , ω_2) направляються на блок розділення поляризаційного променя (PBS).

Один з променів спрямовується на нерухомий світловідбивач, а інший – на рухомий світловідбивач. Через рух промінь, що відбивається від рухомого ретрорефлектора, зазнає доплерівського зсуву. Обидва промені знову об'єднуються в задній частині PBS, де виникають завади.

Зсув фази вимірювального сигналу від детектора порівнюються з опорним сигналом від фотодетектора 1. зміщення рухомого дзеркала потім може бути вилучено шляхом вимірювання фазового зсуву, який вимірюється, двох сигналів [9].

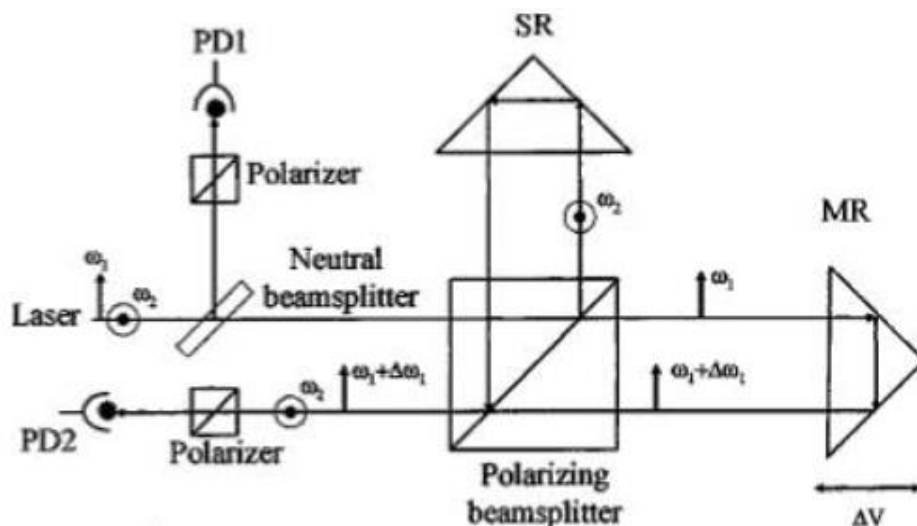


Рисунок 1.1 – Схема гетеродинного інтерферометра

Автори [15] представили новий метод вимірювання фази від фазового сповільнення хвильових пластин за допомогою гетеродинного інтерферометра. На рисунку 1.2 показано лінійно поляризоване світло з довжиною хвилі λ_1 або λ_2 , що проходить через електрооптичний модулятор. Він падає на BS, а потім розділяється на два пучки рівної амплітуди. Відбите світло проходить через аналізатор, а потім надходить у фотоприймач Dr.

Світло, що пропускається, проходить крізь випробувану хвильову пластину, а також аналізатор і виявляється іншим фотоприймачем Dt. Різниця фаз між двома променями потім вимірюється за допомогою фазометра.

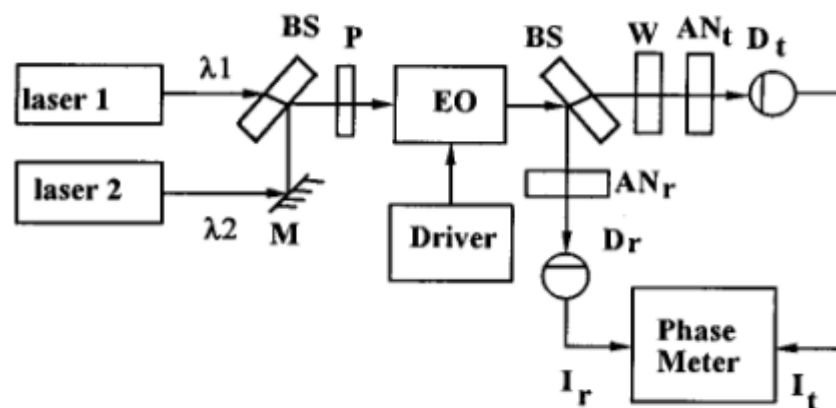


Рисунок 1.2 - Схема гетеродинного інтерферометра

Пізніше була запропонована модифікація попередньої установки для вимірювання кутів на основі гетеродинного інтерферометра та повного внутрішнього відбиття. Установка, показана на рисунку 1.2, змінена шляхом заміни випробувальної хвильової пластини рухомою призмою. Ця модифікована схема показана на рисунку 1.3 [16].

У цій установці сигнал, виміряний Dt, є тестовим сигналом, а сигнал, виміряний Dr, є опорним сигналом. Обидва сигнали надсилаються на фазометр, і виходить їх різниця фаз Φ_r .

Потім випробувальну призму видаляють, щоб світло, що пройшло, проходило через аналізатор і Dt, на цей раз фазометр вимірює фазу опорного

сигналу як Φ_t . Отже, різниця фаз між s і p поляризацією визначається за рахунок повного внутрішнього відбиття і може бути виражена [9]:

$$\Phi = \Phi_t + \Phi_r \quad (1.2)$$

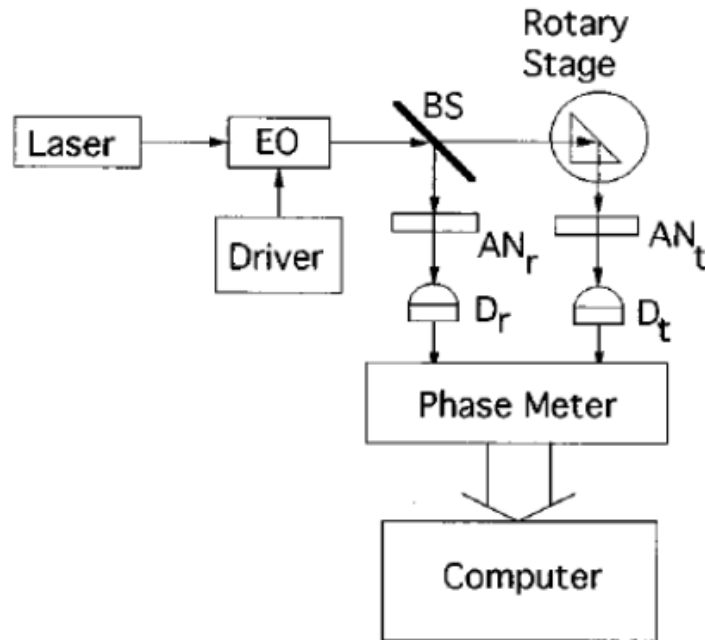


Рисунок 1.3 - Схема установки для вимірювання кутів нахилу.

Кут нахилу можна обчислити, підставивши Φ у рівняння Френеля. Рівняння Френеля описують відбиття та передачу електромагнітних хвиль на межі розділу між двома шарами з різними показниками заломлення. Тобто вони дають коефіцієнти відбиття і пропускання хвиль з електричним полем, паралельним і перпендикулярним площині падіння. Для світла із середовища з коефіцієнтом n_1 , що падає на середовище з коефіцієнтом n_2 під кутом θ_i та кутом пропускання θ_t , рівняння Френеля дають такі коефіцієнти відбиття [9]:

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (1.3)$$

i

$$r_{\perp} = \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (1.4)$$

1.4 Вимірювання нахилу за допомогою інтерферометра циклічного шляху

Інтерферометр з циклічним трактом є типом інтерферометра з двопроменевим поділом амплітуди, який вперше обговорювався Майкельсоном [17] та Харіхараном [18]. Першим варіантом цього інтерферометра був трикутний циклічний інтерферометр. Цей тип інтерферометра використовує дільник променя, щоб розділити промінь на два промені, які в ідеалі проходять ту саму петлю в протилежних напрямках перед рекомбінацією. Цей тип інтерферометра має три основні переваги: По-перше, його дуже легко налаштувати. По-друге, це обмежує ступені свободи в системі, по-третє, знижує вимоги як до довжини когерентності джерела, так і до кутової стабільності променя. Схема першого варіанту інтерферометра циклічного тракту показана на рисунку 1.4 [19].

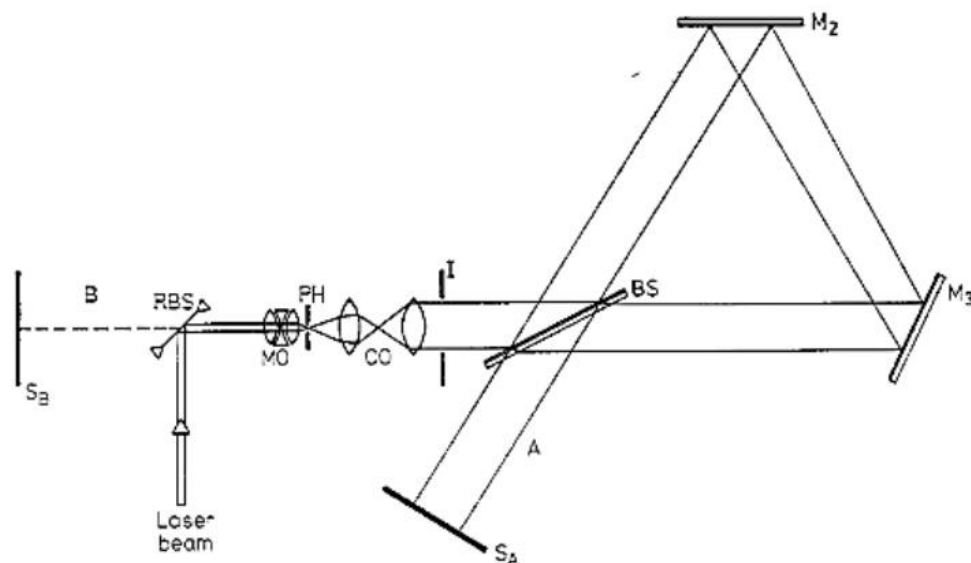


Рисунок 1.4 - Схема циклічного інтерферометра

Згідно з рисунком 1.4, розширення та колімація лазерного променя здійснюються за допомогою об'єктива мікроскопа та колімаційної лінзи. Варто зазначити, що джерелом світла, використаним у цій системі, був He-Ne 5 мВт лазер з довжиною хвилі 632,8 нм і був лінійно поляризованим у режимі TEM₀₀.

Автори [20] представили новий метод вимірювання малих кутів нахилу з використанням тієї ж установки, що й на рисунку 1.4. Циклічний інтерферометр встановлений на поворотному столику, і бічний зсув створюється поляризацією, який при приведенні в той самий стан поляризації поляризатором створює інтерференційну смугу бічного зсуву.

При обертанні інтерферометра циклічного шляху між ортогонально поляризованими променями вводиться зміна фази, оскільки кут падіння змінюється. Це призводить до просторового зміщення інтерференційних смуг. За допомогою методики поляризаційного зсуву фаз вимірюється різниця фаз між двома променями [20].

1.5 Вимірювання нахилу за допомогою інтерферометра Мурті

Інтерферометр Мурті — інтерферометр бічного зсуву, розроблений Мурті для перевірки оптичних елементів [8]. Цей метод, як і інші інтерферометричні методи, оснований на зміні в різницях оптичного шляху між двома променями, які в даному випадку є променями, відбитими від передньої та задньої поверхонь паралельної пластини.

Ця плоска паралельна пластинка показана на рисунку 1.5.

Різницю оптичного шляху між відбиттям від задньої і передньої поверхонь можна виразити як

$$OPD = 2nt\cos\theta' \quad (1.5)$$

де t — товщина плоскої пластини,

n — показник заломлення пластини у вакуумі,

θ' — кут заломлення, що відповідає куту падіння.

У разі потрапляння світла на скляну пластину під двома різними кутами, такими як θ_1 і θ_2 , різниця між різницею оптичних шляхів для повернутого і неповернутого променя буде становити

$$OPD_1 - OPD_2 = 2nt(\cos\theta'_1 - \cos\theta'_2) \quad (1.6)$$

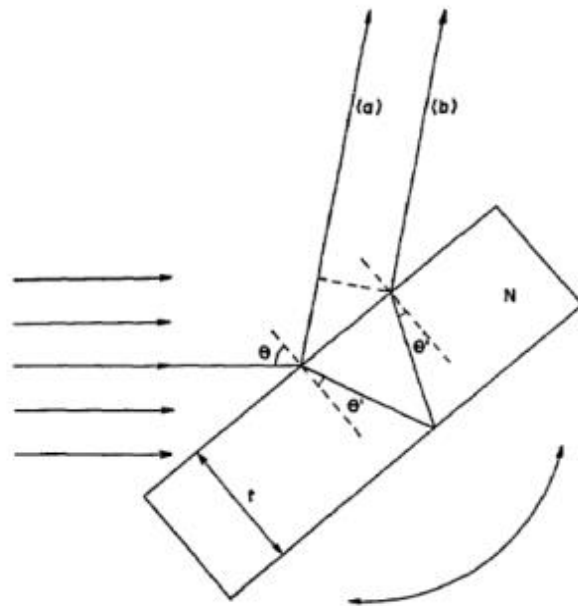


Рисунок 1.5 - Плоскопаралельна скляна пластина, яка використовується в інтерферометрі Мурті

Відповідно до закону Стокса, деструктивне втручання відбудеться у випадку

$$OPD_1 - OPD_2 = m\lambda \quad (1.7)$$

де m — ціле число,

λ — довжина хвилі джерела світла, що використовується.

Використовуючи рівняння (1.6) і (1.7), кут повороту скляної пластини буде розраховано за $\theta_2 - \theta_1$ [8].

1.6 Вимірювання нахилу за допомогою еталону Фабрі-Перо

Еталон Фабрі-Перо зазвичай виготовляється з прозорої пластини з двома відбиваючими поверхнями.

Як показано на рисунку 1.6, інтерференція виникає між множинними відбиттями світла між двома відбиваючими поверхнями. Конструктивні перешкоди виникають, якщо промені, що передаються, знаходяться в фазі, а деструктивні — якщо вони не по фазі. Від того, чи багатократно відбиті

промені є синфазними чи ні, залежить від λ довжини хвилі світла, θ кута падіння світла на еталон, l , товщини еталону та n , показника заломлення матеріалу між відбиваючими поверхні [7].

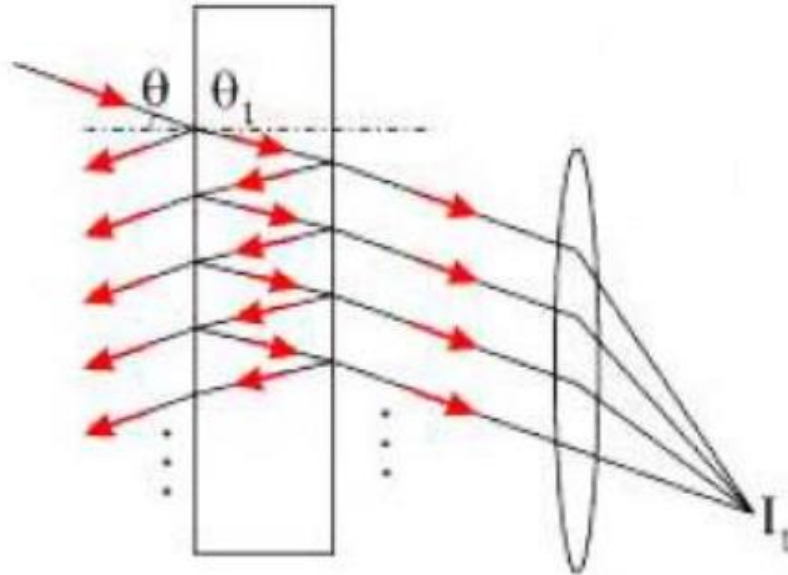


Рисунок 1.6 - Еталон Фабрі-Перо

Ця схема вимірювання кута була запропонована [7] і має реалізацію, яка показана на рисунку 1.7.

Тут перший PBS розділяє лінійно поляризований лазерний промінь порівну на два промені, L1 і L2, обидва яких також лінійно поляризовані. Ці два промені проходять через еталон Фабрі-Перо, який знаходиться на обертальній ступіні, що приводиться в рух п'єзоприводом, який керується комп'ютером, а потім проходять через другий PBS, який спрямовує L1 і L2 до фотодетекторів PD1 і PD2[7]. Коли еталон обертається, обидва промені зазнають фазового зсуву, який можна виявити та пов'язати з обертанням. Точність вимірювання обертання з цією установкою становить 0,01 дугова секунда.

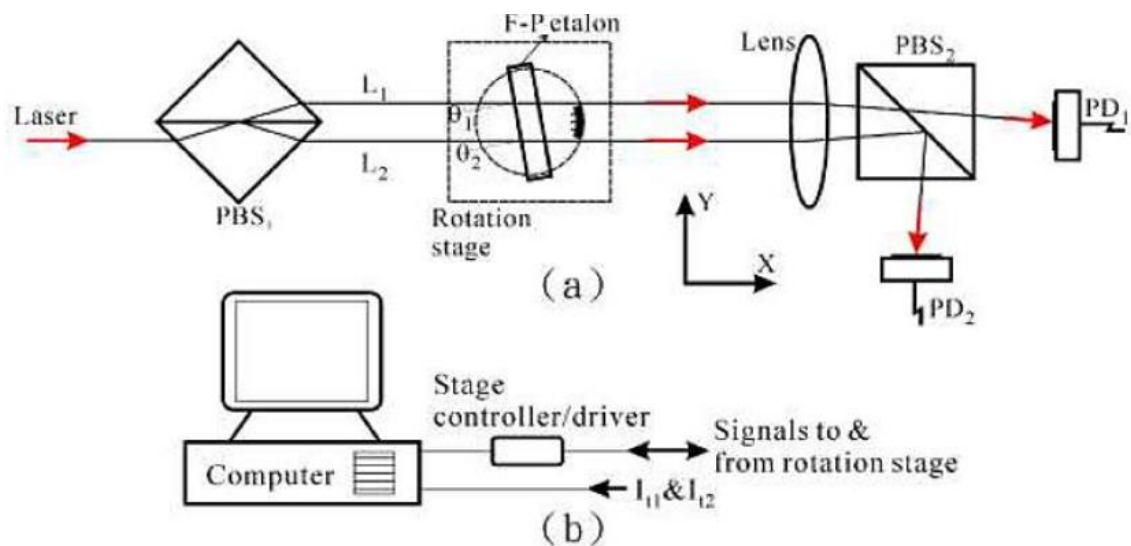


Рисунок 1.7 а) Схема кутового зонда та б) системи керування та обробки сигналів

Висновки

У розділі проведено аналіз принципів роботи та складу систем, що здатні вимірювати значення кута нахилу поверхонь. Наведені системи мають оптичну та електронну складові. Поєднання цих складових дозволяє отримувати велику точність вимірювання при автоматизованому процесі.

Розділ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОПТИЧНОГО НАХИЛОМІРА

2.1 Розробка математичної моделі роботи оптичного кутоміра

Використаємо відому[10] схему оптичного нахиломіра, яка будується на основі інтерферометра. Установка для вимірювання нахилу за допомогою інтерферометра циклічного шляху показана на рисунку 2.1.

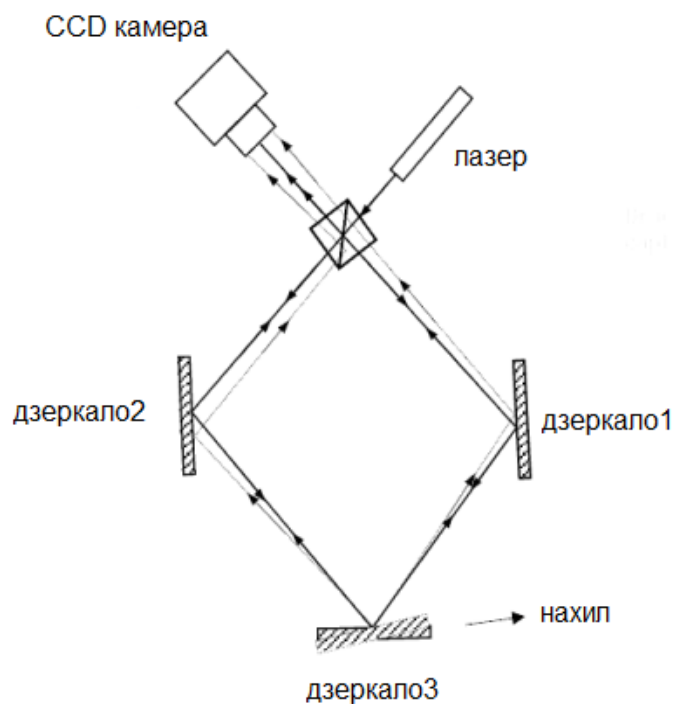


Рисунок 2.1 Схема інтерферометра циклічного шляху з 4 дзеркалами

Установка з трьома дзеркалами (інтерферометр прямокутного циклічного шляху) виявляється вдвічі чутливішою, ніж класичний інтерферометр Майкельсона. Як було зазначено раніше, оскільки два промені, що поширюються зустрічними, рухаються ідентичними шляхами, інтерферометр нечутливий до зовнішніх коливань і турбулентностей.

Принципова схема цього інтерферометра наведена на рисунку 2.1 [10]. Розділювач променів 50/50 використовується для створення двох променів однакової амплітуди. Обидва промені рухаються по одному шляху, але в

протилежному напрямку. Після проходження два промені рекомбінуються в роздільному пристрої, де вони інтерферують, дзеркала 1 і 2 фіксуються, а дзеркало 3 вносить нахил. Нахиляючи дзеркало 3, два промені проходять через дещо різні шляхи, викликаючи, таким чином, лінійне збільшення або зменшення фазової зміни в площині хвильового фронту, що призводить до появи смуг однакового нахилу в області перекриття. Різниця шляху, викликана нахилом у випадку циклічного інтерферометра в обох променях, рівні, але мають різні знаки, позитивні для одного і негативні для іншого.

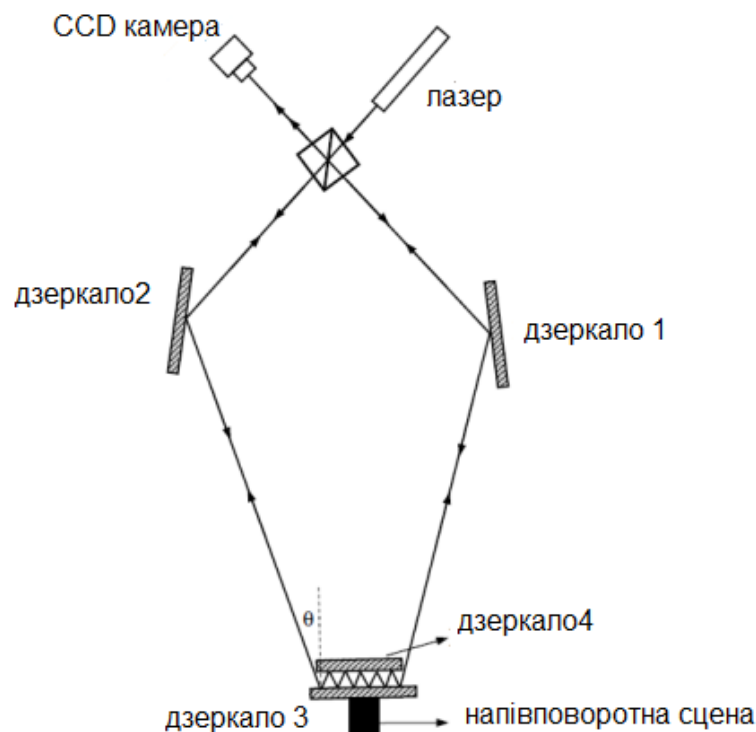


Рисунок 2.2 Схема інтерферометра циклічного шляху з множинними відбиттями

Для підвищення чутливості системи при вимірюванні кутів нахилу була описана нова система, в якій два промені багаторазово відбиваються між двома паралельними дзеркалами[10]. Модифіковане схематичне розташування з установкою багаторазового відбиття показано на рисунку 2.2. У змінній установці Дзеркало 3 було замінено двопаралельним розташуванням дзеркала, де Дзеркало 3 встановлено на наноповоротній сцені. Коли промені надходять до дзеркала 3, вони починають відбиватися

між дзеркалом 3 і 4. Пройшовши через серію множинних відбить, промені залишають дзеркала 3 і дзеркала 4 і знову рекомбінують у BS. Кількість кратних відбить збільшує чутливість до нахилу в $2N$ раз, де N – кількість відбить, що відбуваються на дзеркалі 3.

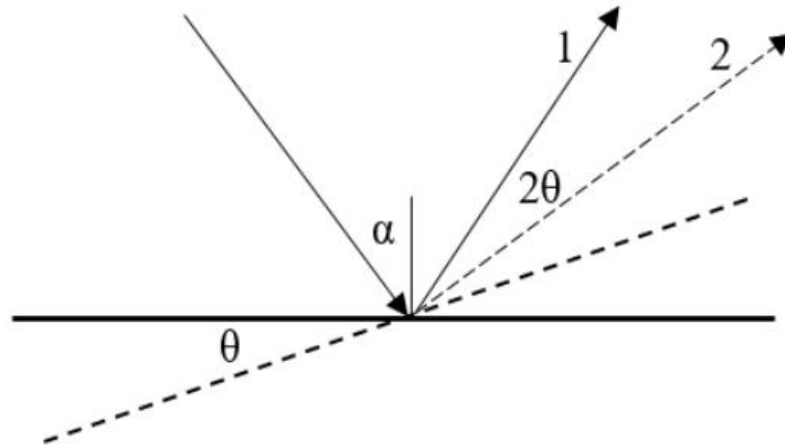


Рисунок 2.3 Вплив обертання дзеркала на відбиваючі промені.

Як показано на рисунку 2.3, згідно з основним законом відбиття в геометричній оптиці, коли промінь світла падає на плоске дзеркало під кутом α , промінь буде відбиватися від поверхні дзеркала під кутом α . Якщо дзеркало повернути на кут θ , то відбитий промінь повернеться на кут 2θ [22].

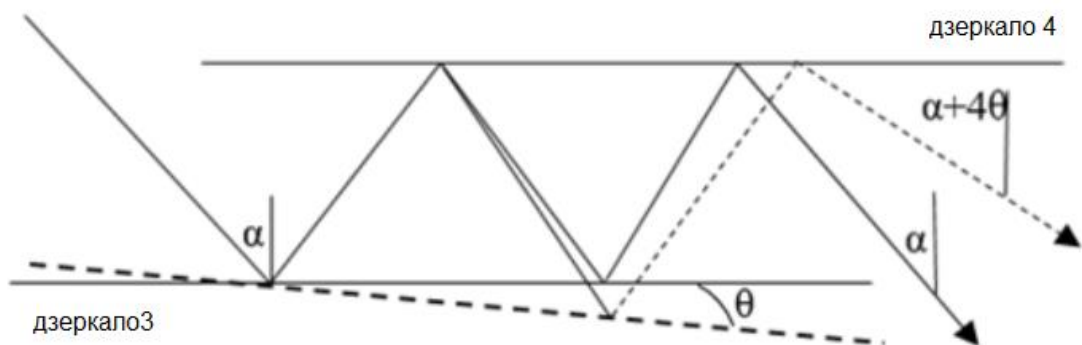


Рисунок 2.4 Ефект обертання одного з двох дзеркал в установці з плоскими паралельними дзеркалами

У випадку двох паралельних плоских дзеркал, наприклад, Дзеркало 3 і Дзеркало 4 на рисунок 2.4, коли промінь потрапляє на дзеркало 3 під кутом α , він починає кілька разів відбиватися між двома дзеркалами і нарешті вийде з

однаковим кутом α . Якщо дзеркало 3 повернути на кут θ , де θ набагато менше ($\theta \ll \alpha$), то після одного відбиття кут α збільшиться вдвічі, як у випадку з одним дзеркалом. Після кожного відбиття променя кут подвоюється. Таким чином, промінь, що виходить із системи, в кінцевому підсумку повертається на кут $2N\theta$, який N є числом відбиттів на нахиленому дзеркалі [22].

В інтерферометрі циклічного шляху обидва промені проходять однакову відстань, перш ніж рекомбінувати в променевому розділювачі. Як показано на рисунку 3.2, щоб створити більше відбиттів між дзеркалом 3 і дзеркалом 4, кут θ , тобто кут між променями, коли вони входять і виходять з дзеркалом 3, повинен бути якомога меншим. Зв'язок між відстанню між двома дзеркалами (d), довжиною дзеркала 3 (L), кутом падіння (θ) і кількістю відбиттів (N) має такий наступний вигляд[10]:

$$N = \frac{1}{2d} \cdot \frac{L}{\tan(\theta)} \quad (2.1)$$

Тобто кількість відбиттів обернено залежить від кута падіння та відстані між дзеркалами, навіть якщо N збільшується з довжиною дзеркала 3. Щоб промінь легко входив у дзеркала, дзеркало 3 трохи довше, ніж дзеркало 4. .

Якщо припустити, що два промені знову об'єднуються в BS, де виникають перешкоди, Z – це відстань між віртуальною точкою за дзеркалом 3 і BS. Якщо в систему не вводиться нахил, два променя збігатимуться в BS, але коли дзеркало 3 нахилено на кут α , центри двох променів будуть розділені на відстань AB , як показано на рисунку 2.5. У цьому випадку, якщо X є відстанню між центром променя до будь-якої точки променя, оптичну різницю шляху між двома променями за умови малого кута можна розрахувати за допомогою рівняння (2.2) [10]

$$OPD = 4XN\alpha \quad (2.2)$$

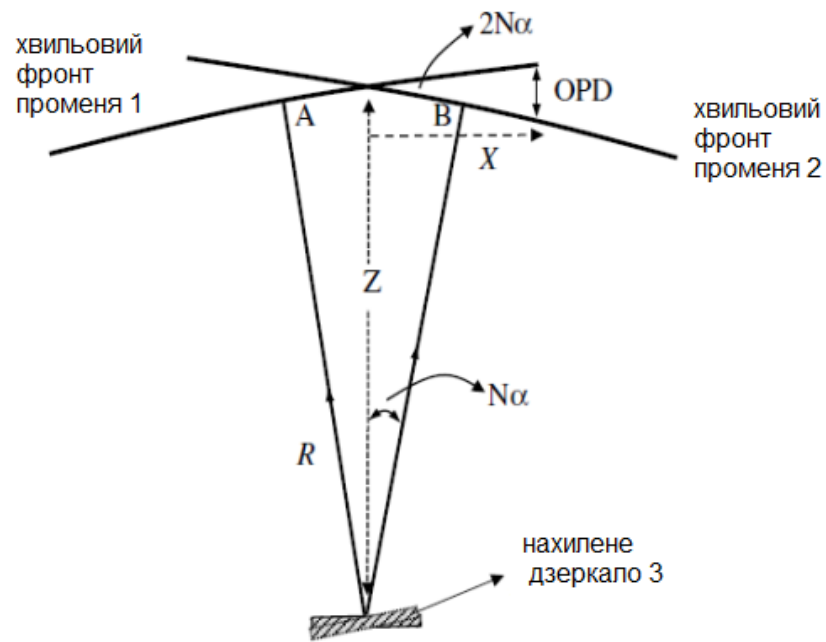


Рисунок 2.5 Вплив нахилу на промінь в інтерферометрі циклічного тракту

Тоді кут нахилу можна розрахувати за допомогою рівняння (2.3). У цьому рівнянні було припущено, що хвильовий фронт не має абераций. Подальші дослідження впливу абераций на вимірювання нахилу були проведені і показали, що сферична аберация буде вносити великі похибки у вимірювання нахилу [23].

$$\alpha = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{4XN} \quad (2.3)$$

Існують три можливі способи вимірювання відстань між границями, що спостерігається в області перекриття циклічного інтерферометра.

Перший метод є основним методом, що використовує трасування бахроми, де бахроми стають тоншими та оцінюється відстань між ними.

У другому методі, коли отримують відносно велику кількість смуг, можна використовувати метод перетворення Фур'є для виділення загальної фази і, таким чином, нахилу.

Третій і надійний метод полягає в застосуванні процедури кроку фази для вилучення фази. У попередній роботі [10] використовувався інший метод, припускаючи, що утворені смуги мають одиничний косинус-квадрат ($\cos^2$) видимості, підігнаний до смуг, і фаза була виділена.

У випадку смуг із меншою видимістю віднімали постійне значення інтенсивності, а потім смуги узгоджували з профілем косинуса. Однак недоліком цієї оцінки є те, що в полі має бути принаймні одна границя, яка встановлює природну нижню межу для найменшого кута нахилу, який можна виміряти цим методом.

2.2 Метод відстеження краю

У цьому методі виявляються положення окремих країв і використовуються як точки інтерполяції. Це пояснюється тим, що значення фази для кожної смуги відоме принаймні відносно інших смуг.

Усі точки вздовж смуги мають однакове значення фази, тоді як різниця фаз між сусідніми смугами дорівнює 2π . На наступному кроці проміжні значення фази між смугами інтерполуються з використанням межових значень у центрі як точок інтерполяції. У методі трасування смуг все ще існує помилка у виявленні центру країв, незважаючи на використання комп'ютерної обробки.

2.3 Метод перетворення Фур'є

Цей метод оснований на перетворенні Фур'є розподілу інтенсивності інтерферограмної картини. У цьому методі, коли смуги орієнтовані вздовж одного напрямку, так що несучий сигнал більш високої частоти модулюється низькочастотним вихідним сигналом, тоді можна виконати одновимірне перетворення Фур'є вздовж лінії, перпендикулярної до смуг. Перетворення Фур'є дає центральний максимум і два піки бічного порядку, які несуть низькочастотний сигнал. Потім використовується смуговий фільтр для виділення однієї з бічних смуг у Фур'є спектру. Ця бічна смуга потім

центрується, і інформація про фазу витягується шляхом виконання зворотного перетворення Фур'є.

2.4 Метод фазового зсуву

Щоб отримати кількісні дані з інтерференційної картини, необхідно виділити різницю фаз між двома променями. У цьому методі відома різниця фаз вводиться між двома променями за кілька кроків. Після кожного кроку записується зображення інтерференційної картини. З відомим зсувом фази можна розрахувати початкову різницю фаз між заважаючими променями. У літературі розроблено багато алгоритмів для виконання цього завдання, і найбільш часто використовуваним методом є чотирифазний кроковий метод. Дані цього алгоритму будуть використані для розрахунку первинної різниці фаз між заважаючими променями [6]. Метод фазового степінгу має масу переваг у порівнянні з іншими методами:

- Висока точність вимірювання
- Швидке вимірювання
- Хороші результати з низьким контрастом бахром
- Результати не залежать від коливань інтенсивності в різних зіницях

В інтерферометрії використовуються два типи фазового кроку, а саме часовий фазовий крок і просторовий фазовий крок.

Коли дифракційну решітку переміщують через промінь світла, в дифракційні промені вводиться доплерівський зсув. Напрямок передачі перпендикулярно напрямку поширення. Зсув частоти пропорційний порядку дифракції m і швидкості v і обернено пропорційний періоду решітки d , або

$$\Delta v = \frac{mv}{d} \quad (2.4)$$

Недифрагований промінь не має зсув частоти. Промені, дифраговані в тому ж напрямку, що і передача здійснює додатний зсув частоти, тоді як промені, дифраговані в протилежному напрямку, мають свою частоту

зниженою. Один із дифракційних порядків вибирається та перешкоджає вихідній частоті для створення фазового інтерферометра [25]

У фазовому зсуві поляризації, як правило, опорна і тестова хвилі з лінійною ортогональною поляризацією перетворюються на протилежні кругові поляризації і пропускаються через лінійний поляризатор. (геометричний) фазовий зсув вводиться шляхом зміни кутової орієнтації напрямку проходження поляризатора. Поляризаційний фазовий зсув був застосований до різних інтерферометричних конфігурацій [25].

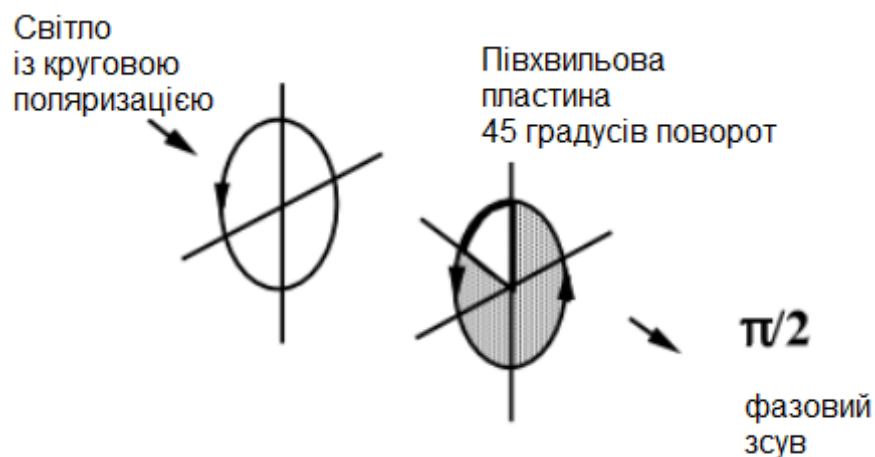


Рисунок 2.6 - Поляризаційний фазообертач

Найважливішою перевагою цього методу є те, що він дозволяє одночасно фіксувати всі необхідні інтерферограми зі зміщеними фазами, тим самим знижуючи вібраційну сприйнятливість до мінімуму та розширюючи область вимірювань до динамічної інтерферометрії.

2.5 Чотирикроковий алгоритм із постійною видимістю

Найпростіший алгоритм, який вводить фазовий зсув у 3 кроки, що призводить до 4 вимірювань [6].

Різниця фаз, що вводиться на кожному кроці, становить $\pi/2$. Якщо фазовий зсув, введений в систему, дорівнює δ і має чотири значення, а саме:

$$\delta_i = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}; i = 1, 2, 3, 4$$

Підставляючи ці значення δ в рівняння (2.5)

$$I(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \delta(t)) \quad (2.5)$$

Де I' – середня інтенсивність,

I'' – границя або модуляція інтенсивності.

Якщо припустити, що при введенні фазового кроку видимість країв не зміниться. Результат буде таким, як показано в рівняннях (2.6) - (2.9):

$$I_1(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos(\varphi(x, y)) \quad (2.6)$$

$$I_2(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \frac{\pi}{2}) \quad (2.7)$$

$$I_3(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \pi) \quad (2.8)$$

$$I_4(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \frac{3\pi}{2}) \quad (2.9)$$

Використання тригонометричних тотожностей призведе до:

$$I_1(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos(\varphi(x, y)) \quad (2.10)$$

$$I_2(x, y, t) = I'(x, y) - I''(x, y)\sin(\varphi(x, y)) \quad (2.11)$$

$$I_3(x, y, t) = I'(x, y) - I''(x, y)\cos(\varphi(x, y)) \quad (2.12)$$

$$I_4(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y)\sin(\varphi(x, y)) \quad (2.13)$$

Розв'язавши ці чотири рівняння з трьома невідомими φ , буде розраховано значення для кожної точки на інтерферограмі. Розрахунок можна зробити лише за допомогою трьох зображень, але для полегшення розрахунку додається четверте. Розв'язок цих рівнянь для φ показано в рівняннях (2.14)–(2.17).

$$I_4 - I_2 = 2I''(x, y)\sin(\varphi(x, y)) \quad (2.14)$$

$$I_1 - I_3 = 2I''(x, y)\cos(\varphi(x, y)) \quad (2.15)$$

Беручи відношення (2.19) і (2.20), член $2I''$ усувається, залишаючи нам таке:

$$\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{\sin(\varphi(x, y))}{\cos(\varphi(x, y))} = \tan(\varphi(x, y)) \quad (2.16)$$

Отримуємо величину різниці фаз між двома заважаючими променями

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (2.17)$$

2.6 Метод фазової диференціації з постійною видимістю

Цей метод працює як метод фазового зсуву, але різниця в тому, що потрібні лише два кроки відомого значення [27]. Рівняння для інтерференції між опорним і тестовим хвильовим фронтом виглядає:

$$I_1(x, y, t) = I_0\{1 + \gamma \cos(\delta(x, y))\} \quad (2.18)$$

де I_0 — середня інтенсивність,

γ — видимість інтерференційної картини,

$\delta(x, y)$ – фаза хвильового фронту.

На наступному кроці в один з променів вводиться фазовий зсув $\pi/2$, результатом якого буде друга інтерференційна картина з інтенсивністю:

$$I_2(x, y, t) = I_0\{1 - \gamma \sin(\delta(x, y))\} \quad (2.19)$$

Слід зазначити, що будь-яке значення фазового кроку може бути введено в систему для створення другої інтерференційної картини. В [27] використовували фазовий крок $\pi/2$ для простоти обчислень. Кожна з фазових інтерференційних смуг зсувається на кілька пікселів уздовж напрямку у або х, що залежить від нахилу хвильового фронту. Якщо зсув має бути вздовж одного напрямку, це можна зробити шляхом введення відомої величини нахилу [27].

Рівняння для даних диференціальної інтенсивності для випадку, коли нахил знаходиться вздовж осі х, можна виразити як:

$$I_1^d = I_1(x + \Delta x, y) - I_1(x, y) = I_0\gamma\{\cos(\delta(x + \Delta x, y)) - \cos(\delta(x, y))\} \quad (2.20)$$

$$I_2^d = I_2(x + \Delta x, y) - I_2(x, y) = -I_0\gamma\{\sin(\delta(x + \Delta x, y)) - \sin(\delta(x, y))\} \quad (2.21)$$

Δx є бічним зміщенням візерунка бахром. Використовуючи ряд Тейлора, рівняння 2.20 і 2.21 можна спростити до таких рівнянь:

$$I_1^d = -I_0\gamma\{\sin(\delta')[\sin(\delta(x, y))]\} \quad (2.22)$$

$$I_2^d = -I_0\gamma\{\sin(\delta')[\cos(\delta(x, y))]\} \quad (2.23)$$

$$\text{Де } \delta' = (\partial\delta(x, y)/\partial x)\Delta x$$

$\partial\delta(x, y)/\partial x$ $\boxed{f_0}$ — нахил фазової функції.

Отже, фазу в точці (x, y) , f_0 можна розрахувати, поділивши рівняння (2.22) на (2.23):

$$\delta(x, y) = \tan^{-1} \left(\left[\frac{I_1^d}{I_2^d} \right] \right) \quad (2.24)$$

2.7 Метод фазової диференціації зі змінною видимістю

У циклічному інтерферометрі, оскільки промені рухаються по одному шляху, звичайний метод переміщення дзеркала, решітки чи розтягування волокна не може бути використаний, і фазовий зсув буде відбуватися в обох променях. Таким чином, результуюча різниця фаз завжди буде дорівнює нулю.

Тому було розроблено новий простий метод фазового кроку з використанням поляризації. Оскільки промінь лінійної поляризації перетворюється на промінь з круговою поляризацією за допомогою чвертьхвильової пластини, шанси отримати ідеальну кругову поляризацію дуже великі. Крім того, обертання напівхвильової пластини перетворює світло з круговою поляризацією в лінійно поляризований промінь, який буде заважати, коли вони об'єднуються в розділювачі променів. Фазовий зсув вводиться шляхом обертання напівхвильової пластини з кроком 45 градусів.

Це може спричинити зміни амплітуд двох зустрічних променів, що поширюються, і, таким чином, існує ймовірність зміни видимості смуг.

Для подолання цієї проблеми запроваджено новий метод оцінки фази за допомогою методу фазового диференціювання. Якщо I_0 — середня інтенсивність, а γ також видимість інтерференційної картини та $\delta(x, y)$ хвильовий фронт, рівняння для інтерференції між опорним і тестовим хвильовим фронтом виглядає наступним чином:

$$I_1(x, y) = I_0 \{1 + \gamma_1 \cos(\delta(x, y))\} \quad (2.25)$$

Вводиться фазовий зсув на π радіан, і фіксується друге зображення інтерференційної картини.

Фазовий зсув на π вводиться обертанням напівхвильової пластини на $\frac{\pi}{2}$. Амплітуди отриманого лінійно поляризованого світла можуть змінюватися, що спричиняє зміну видимості смуги. Слід зазначити, що середня інтенсивність або зміщення можуть не сильно змінюватися в процесі.

Рівняння для інтерференції фазового зсуву мають вигляд:

$$I_2(x, y) = I_0^2 \gamma_2 \{1 - \gamma_2 \cos(\delta(x, y))\} \quad (2.26)$$

$$I_2(x, y) - I_1(x, y) = I_0' - I_0 - \cos(\delta(x, y)) \{I_0^1 \gamma_1 + I_0^2 \gamma_2\} \quad (2.27)$$

Апроксимуючи, що I_0 і I_0' рівні, рівняння (2.27) матиме вигляд

$$I_1(x, y) - I_2(x, y) = \cos(\delta(x, y)) \{I_0^1 \gamma_1 + I_0^2 \gamma_2\} \quad (2.28)$$

$$\frac{I_1(x + \Delta x) - I_1(x)}{\Delta x} = I_0^1 \gamma_1 \sin(\delta(x, y)) \quad (2.29)$$

$$\Delta I_1 = I_1(x + \Delta x) - I_1(x) = I_0^1 \gamma_1 \sin(\delta(x, y)) \Delta x \quad (2.30)$$

де Δx є бічним зміщенням візерунка бахром.

$$I_0^1 \gamma_1 = \frac{\Delta I_1}{\sin(\delta(x, y)) \Delta x} \quad (2.31)$$

$$\Delta I_2 = I_2(x + \Delta x) - I_2(x) = -I_0^2 \gamma_2 \sin(\delta(x, y)) \Delta x \quad (2.32)$$

$$I_0^2 \gamma_2 = -\frac{\Delta I_2}{\sin(\delta(x, y)) \Delta x} \quad (2.33)$$

Підставивши рівняння (2.31) і (2.33) в рівняння (2.28), отримуємо:

$$I_1(x, y) - I_2(x, y) = \cos(\delta(x, y)) \left\{ \frac{\Delta I_1}{\sin(\delta(x, y)) \Delta x} - \frac{\Delta I_2}{\sin(\delta(x, y)) \Delta x} \right\} \quad (2.34)$$

$$I_1(x, y) - I_2(x, y) = \cot(\delta(x, y)) \left\{ \frac{\Delta I_1}{\Delta x} - \frac{\Delta I_2}{\Delta x} \right\} \quad (2.35)$$

$$\left\{ \frac{\Delta I_1}{\Delta x} - \frac{\Delta I_2}{\Delta x} \right\} = \tan(\delta(x, y)) \{I_1(x, y) - I_2(x, y)\} \quad (2.36)$$

$$\delta(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{\Delta I_1 - \Delta I_2}{(I_1 - I_2) \Delta x} \right] \quad (2.37)$$

Слід відмітити, що максимальне значення фази, отримане за допомогою рівнянь (2.17) і (2.24), становить 2π . Отже, фазова карта буде змінюватися від 0 до 2π , що називається вихідною картою фаз. Щоб отримати фазу, необроблену карту фаз потрібно розгорнути; тобто неоднозначність фази 2π необхідно усунути.

Тут розгортання фази отримує максимальне значення фази вздовж x- і y-напрямків, щоб визначити нахил дзеркала за допомогою циклічного інтерферометра.

Висновки по розділу: Розділ присвячено розробці математичного апарату, що дозволяє описати інтерференційну картину, що створюється при проведенні вимірювання нахилу площини оптичними методами. Розглянуто алгоритми проведення розрахунків.

Розділ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО НАХИЛОМІРА

Схема проведення досліду по дослідженню властивостей оптичного нахиломіра показана на рисунку 3.1. Промінь He-Ne лазера проходить крізь об'єктив мікроскопа, точковий отвір і систему колімаційних лінз.

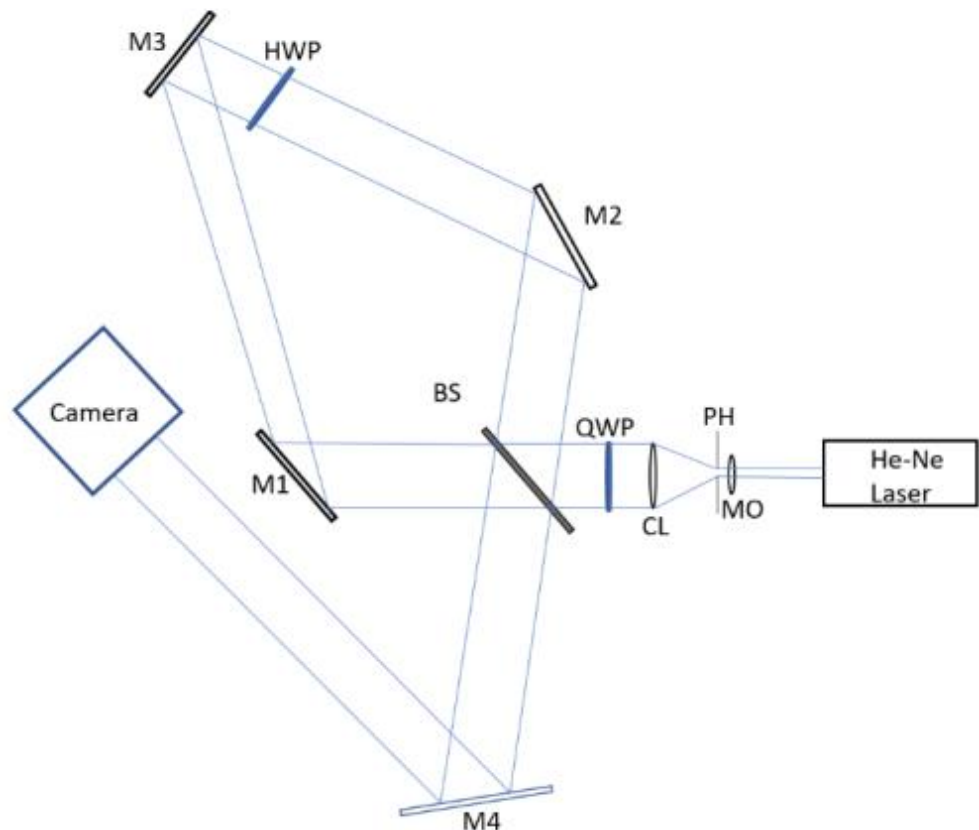


Рисунок 3.1 Схема установки нахиломіра

На схемі, наведній на рисунку 3.1, прийнято наступні позначення:

M1, M2, M3 – дзеркала;

BS – дільник світлового потоку;

MO, CL – лінзи;

QWP, HWP – перетворювачі поляризації, відповідно лінійну в кругову та навпаки.

Просторова фільтрація здійснюється за допомогою об'єктива мікроскопа MOL і PH, які концентрують розбіжний лазерний промінь.

Лазерний промінь колімується після проходження через колімуючу лінзу, розташовану на шляху розбіжного променя так, що фокусна точка колімуючого об'єктива збігається з точкою фокусування, створеною об'єктивом мікроскопа. Колімований промінь вирівнюється паралельно столу. Моделювання роботи нахиломіра здійснено у пакеті прикладних програм 3doptix.

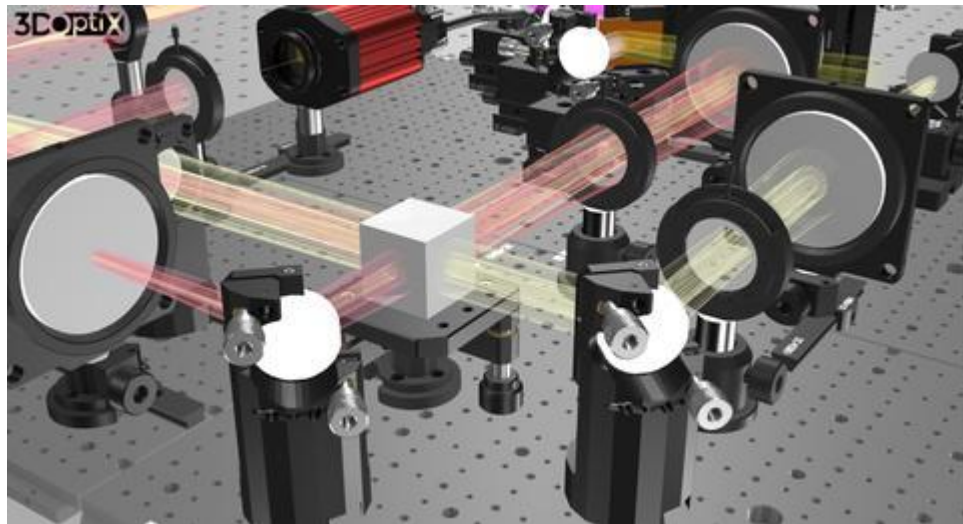


Рисунок 3.2 – Модель нахиломіра

Щоб переконатися, що промінь не сходиться або не розходиться під час свого поширення, у пластині зсуву, розміщеній на шляху променя, створюється єдина бахрома. Переконавшись, що промінь дуже добре колімований, промінь проходить через BS 50/50. Промінь 1 проходить через M1, M3 і M2, а промінь 2 проходить через M2, M3 і M1. Вони обидва знову зустрічаються в BS. Інтерференція двох променів потім записується камерою з великою матрицею пікселів.

Фазові карти хвильового фронту можна отримати за допомогою процедур фазового крокування, і, таким чином необхідно розробити метод введення відомого фазового кроку між зустрічними променями, що поширюються.

Традиційний метод переміщення дзеркала, встановленого на каскаді PZT, для введення фази тут не може бути використаний, оскільки будь-який фазовий зсув, внесений в один промінь, буде ідентичним фазовому зсуву, введеному в зустрічному промені, що поширюється.

Було виявлено, що ступінчастий метод поляризації дуже легко піддається реалізації у вигляді циклічного інтерферометра. Було представлено простий, легкий у реалізації та новий метод фазового кроку з меншою кількістю компонентів. Вихід лазерного променя лінійно поляризується, а потім направляється через чвертьхвильову пластину, яка перетворює лінійно поляризоване світло в світло поляризоване по колу. В одному з плечей циклічного інтерферометра введена напівхвильова пластина, яка перетворює світло з круговою поляризацією назад у лінійно поляризоване світло, коли воно поширюється в обох напрямках. Відомо, що лінійно поляризоване світло, що генерується напівхвильовою пластиною, має фазовий зсув залежно від кута повороту.

Таким чином, відома величина фазового зсуву може бути введена між двома променями шляхом обертання напівхвильової пластини.

Кварцова чвертьхвильова пластина діаметром в половину дюйма була розміщена з оптичною віссю під кутом 45° по відношенню до орієнтації поляризації падаючого лазерного променя. Під цим кутом лінійно поляризоване світло було перетворено в правий промінь кругової поляризації. Напівхвильову пластину діаметром в пів дюйма помістили в одне з плечей нахоломіра. Не важливо, в яке плече, тому що обидва промені рухаються однаковими шляхами.

При обертанні напівхвильової пластини між двома променями вводився фазовий зсув і спостерігалася динамічна зміна смуг. На початкових етапах було помічено, що не тільки введено фазовий зсув, але й незначна зміна видимості бахроми. Зміна видимості була зведена до нуля шляхом ретельного вирівнювання чвертьхвильової пластини, щоб отримати ідеально кругле поляризоване світло.

Було помічено, що при обертанні напівхвильової пластини в систему також вводився невеликий нахил, що робило край нестабільним при обертанні напівхвильової пластини. Щоб зменшити нахил, викликаний напівхвильовою пластиною, її встановили нахиленою, щоб напівхвильова пластина оберталася перпендикулярно падаючому хвильовому фронту. На

кожному кроці півхвильова пластина поверталася на $22,5^\circ$. Таким чином, в кінці чотириступінчастого фазового зсуву досягнутий фазовий зсув становив 90° .

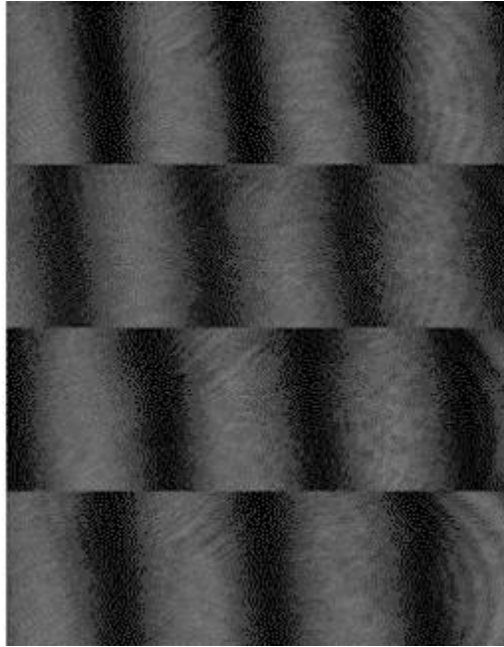


Рисунок 3.3 Вихідні границі нахиломіра

Щоб виділити фазу хвильового фронту, була зроблена серія зображень смуг з фазовим кроком $\pi/2$, введеним після кожної експозиції. Чотири таких зображення було знято як фазовий крок із циклічним переходом від 0 до $3\pi/2$ з кроком $\pi/2$.

У першому методі використовувався чотирикроковий алгоритм, як описано в розділі 2. Чотири зображення фази інтерференційної картини, зсунутої на $\pi/2$, показано на рисунку 3.3. Потім ці зображення були імпортовані в програму Matlab, яка використовувала чотирифазний кроковий алгоритм для оцінки фази. Щоб зменшити шум від помилкових відображень і розсіювання, кожне зображення було оброблено середнім фільтром 5×5 .

Необроблена фазова карта, фазова карта розгортання та фазові графіки, отримані за допомогою коду Matlab, показані на рисунках 3.4, 3.5, 3.6 та 3.7 відповідно.

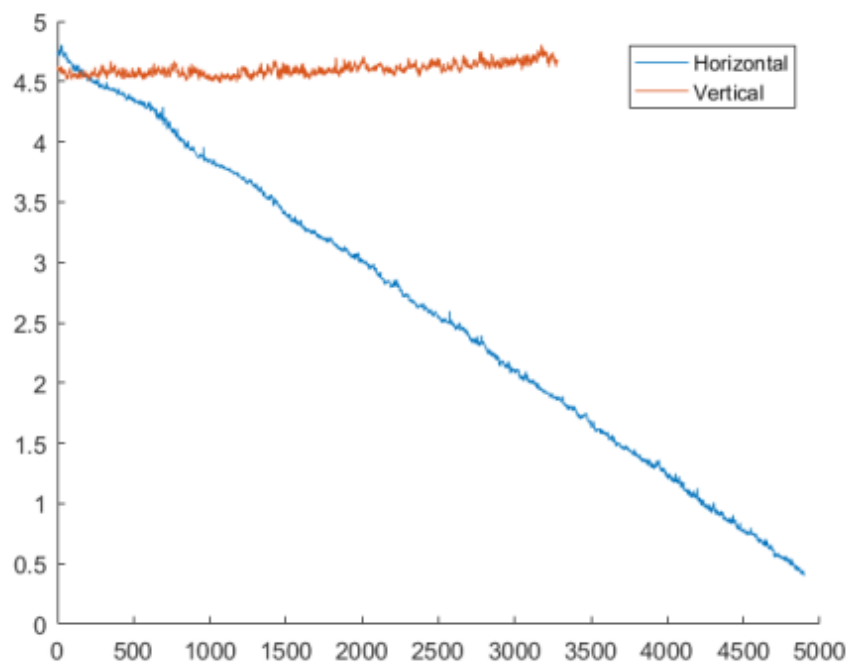


Рисунок 3.6. Двовимірна розгорнута фазова діаграма для чотирьохетапного методу фазового зсуву.

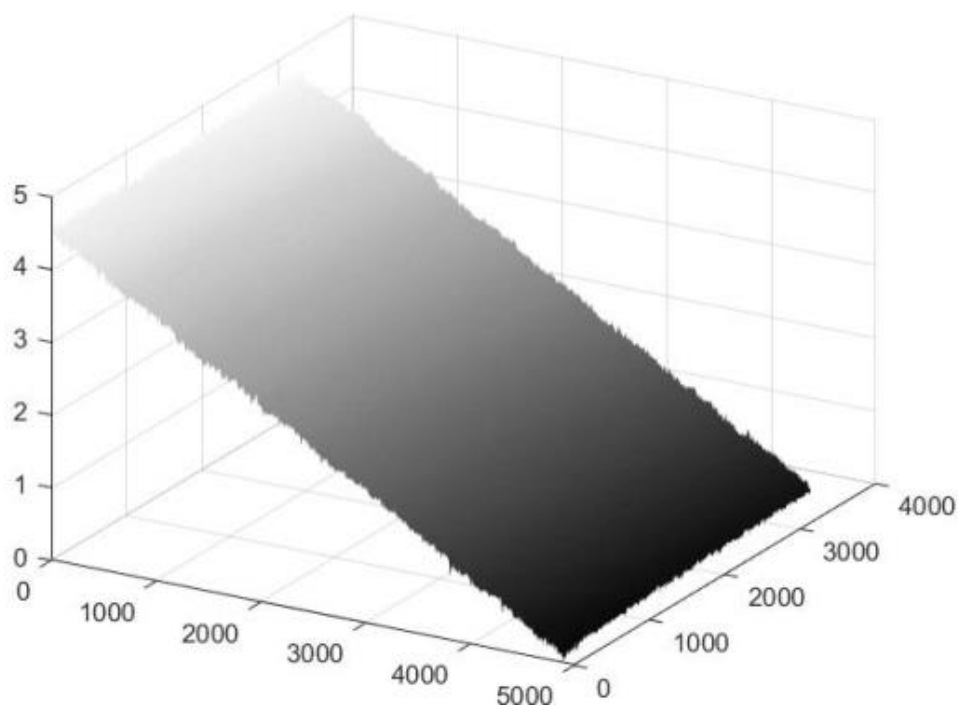


Рисунок 3.7 Тривимірна розгорнута фазова діаграма для чотирьохетапного методу фазового зсуву.

Щоб зменшити кількість фазових кроків, фазу оцінили за допомогою методу фазової диференціації. Оскільки фаза лінійно збільшується з

положенням, метод фазової диференціації є підходящим та легкою альтернативою чотирифазному ступінчастому методу. Крім того, потрібно отримати лише два зображення країв із фазовим кроком $\pi/2$ між ними.

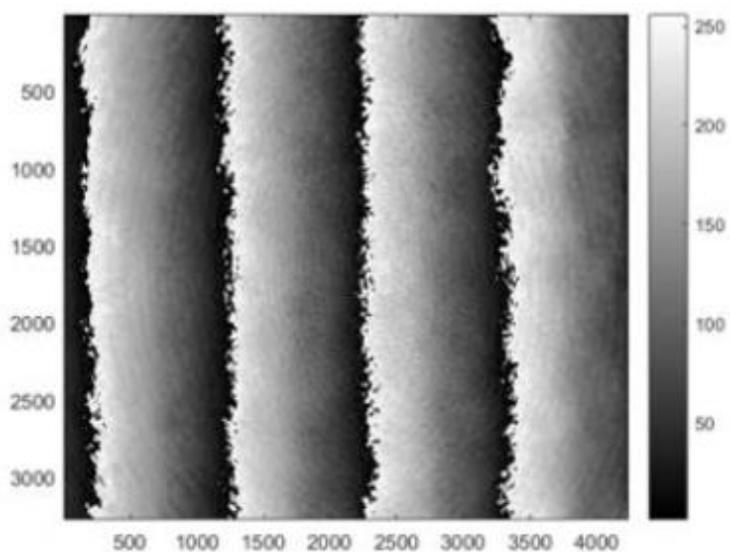


Рисунок 3.8 Вихідна фазова карта, отримані за допомогою методу фазової диференціації

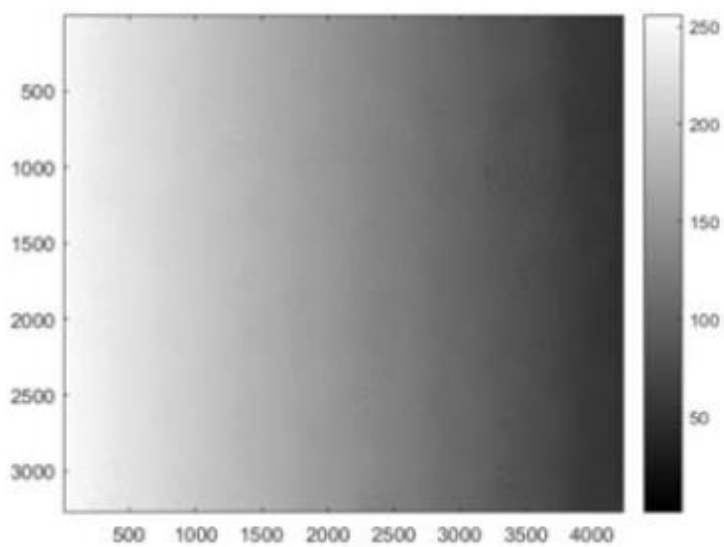


Рисунок 3.9 - Нерозгорнута фазова карта, отримана за допомогою методу фазової диференціації

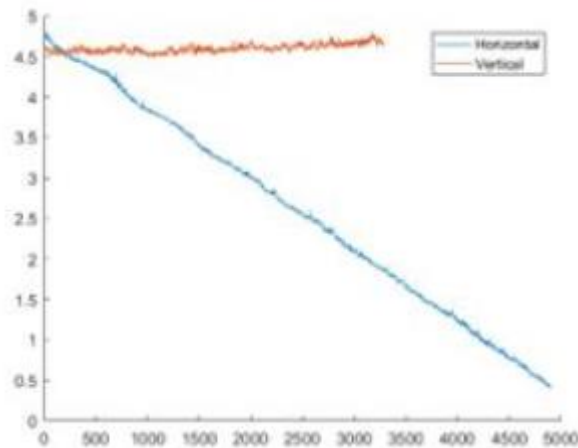


Рисунок 3.10 Лінія вздовж осей x і y , що проходить через центр фазової карти, яка отримана за допомогою методу фазової диференціації

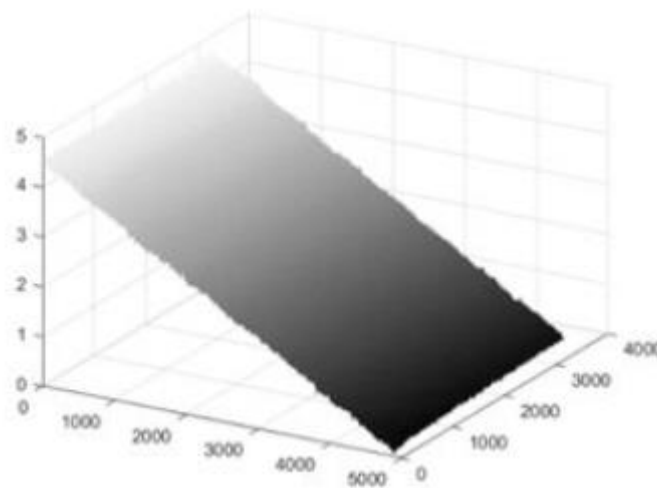


Рисунок 3.11 - Тривимірна діаграма нахиленого хвильового фронту, отриманого за допомогою методу фазової диференціації

3.1 Кількісне вимірювання нахилу на нанорозмірі за допомогою чотирифазного ступінчастого методу

В схемі, наведений на рисунку 3.1 використаємо пластке дзеркало розмірами 50x50 мм, яке нахилимо під кутом до горизонту(дзеркало МЗ на рисунку 3.1).

Використовуючи чотирифазну процедуру кроків, було знято чотири візерунки, а значення нахилу потім автоматично обчислювалося з використанням загальної фази та загальної ширини ПЗЗ-камери разом із рівнянням перетворення:

$$\text{Measured tilt in radians} = \frac{(\text{Phase}_{\max} - \text{Phase}_{\min}) * \lambda}{\pi * \text{pixel size} * \text{number of horizontal pixels}} * \frac{\pi}{180} \quad (3.1)$$

де $\varphi_{\max}$ – зсув фаз в максимумі інтерференційної картини;

$\varphi_{\min}$ – зсув фази в мінімумі інтерференційної картини;

R – розмір пікселя в матриці камери;

N – кількість пікселів в матриці камери по горизонталі.

Нахил дзеркала МЗ поступово зменшувався таким наступним чином: 1000, 500, 200, 50, 20, 5 і 2 нанорадіани. Даний нахил потім порівнювався з вимірним нахилом, використовуючи циклічні інтерферометричні смуги та чотирифазний кроковий режим. На рисунках 4.12–4.19 показані результати для кутів нахилу один одного.

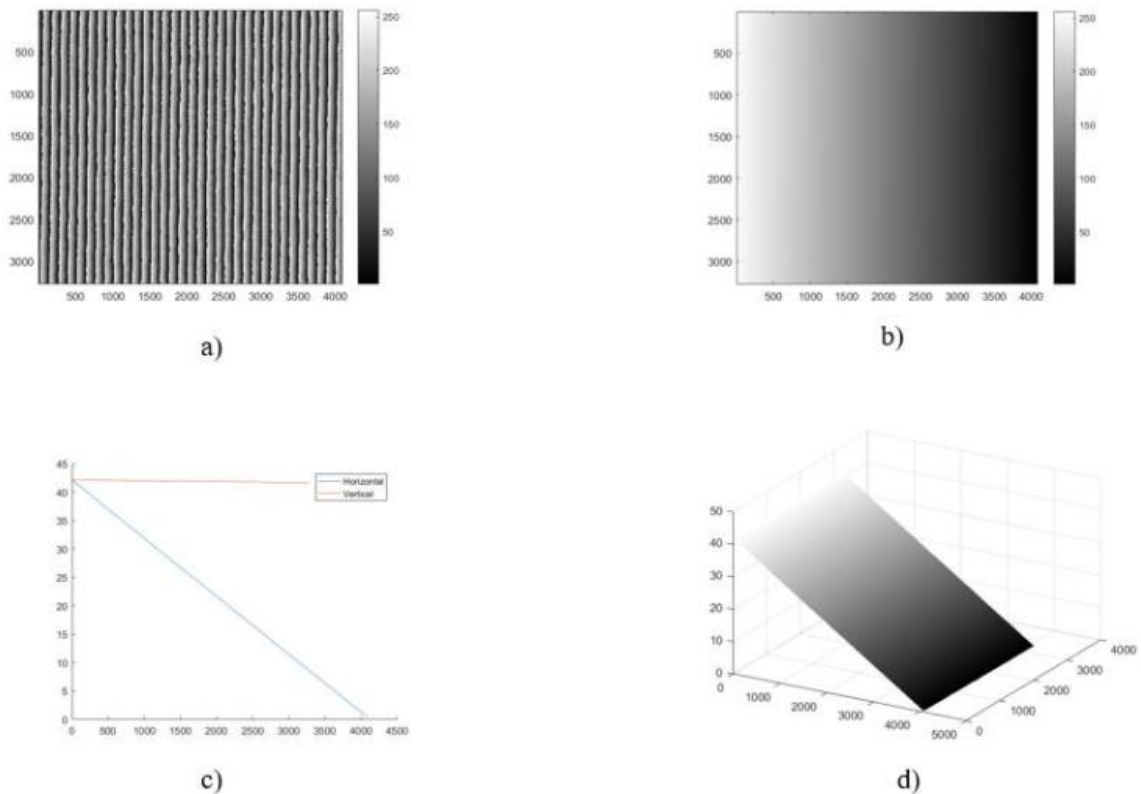
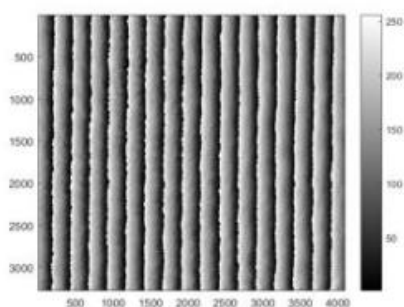
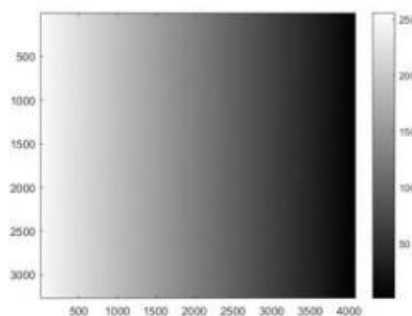


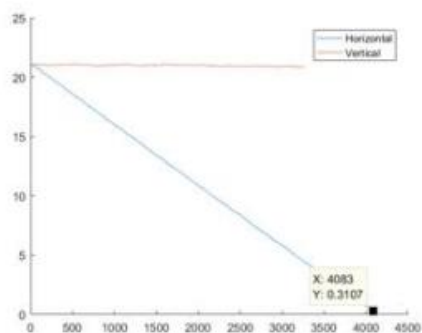
Рисунок 3.12 Результат для нахилу 1000 нанорад, введенного в систему за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, в) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка.



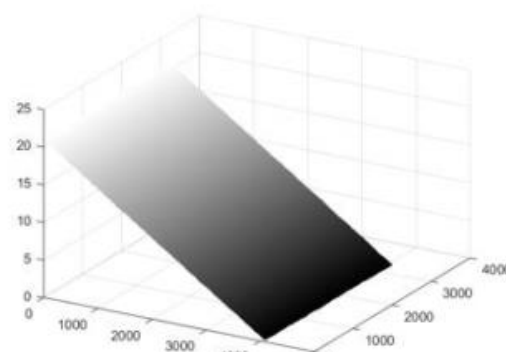
a)



b)

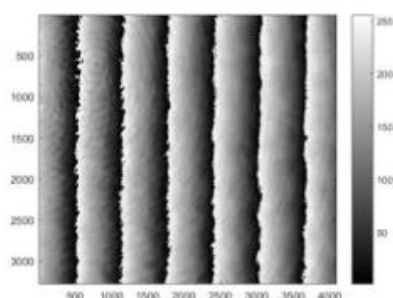


c)

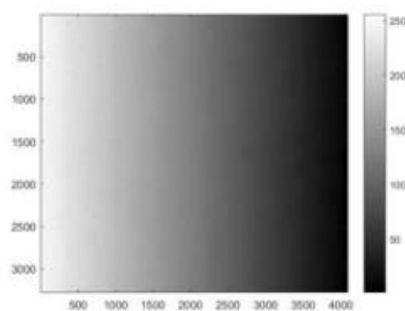


d)

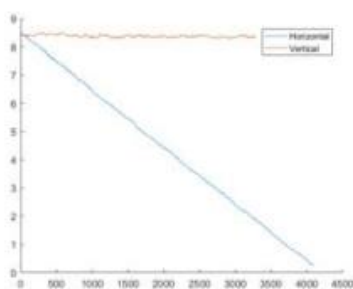
Рисунок 3.13 Результат для нахилу 500 нанорад, введенного в систему за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, в) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка.



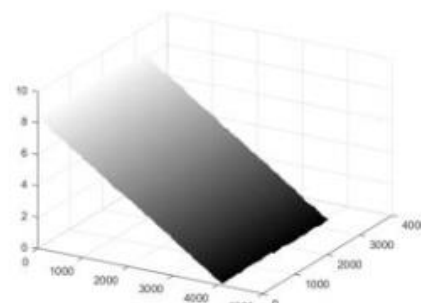
a)



b)

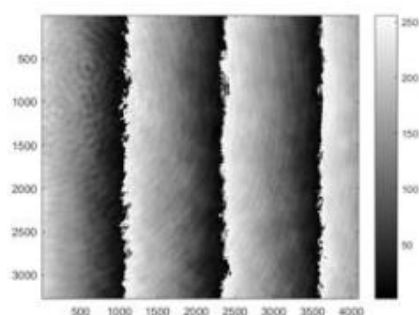


c)

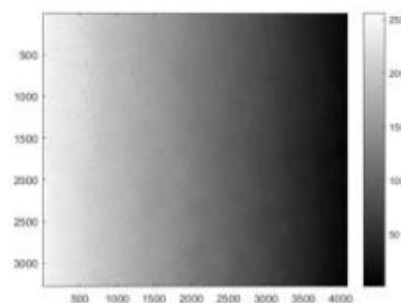


d)

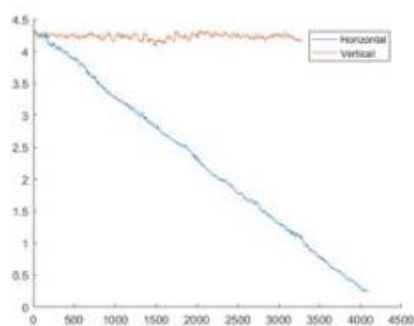
Рисунок 3.14 Результат для нахилу 200 нанорад, введенного в систему за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, в) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка.



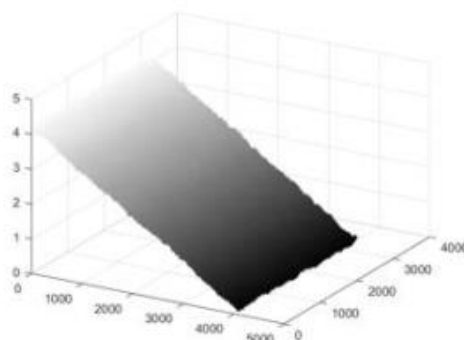
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.15 Результат для нахилу 100 нанорад, введенного в систему за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, в) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка.

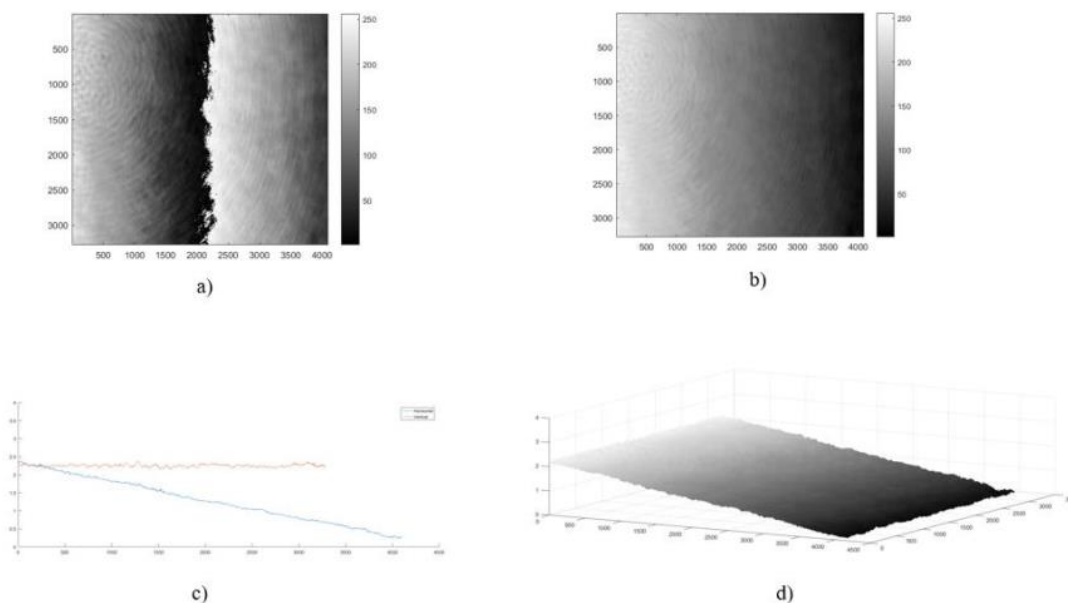


Рисунок 3.16 Результат для нахилу 50 нанорад, введенного в систему за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, в) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка.

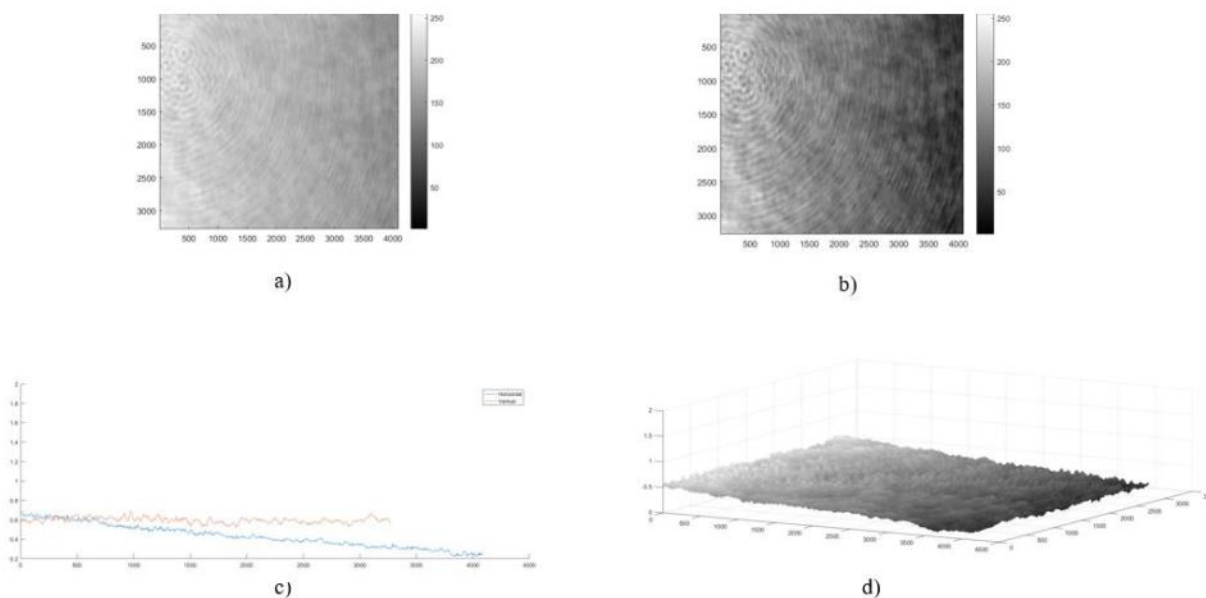


Рисунок 3.17 Результат для нахилу 10 нанорад, введенного в систему за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, в) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка.

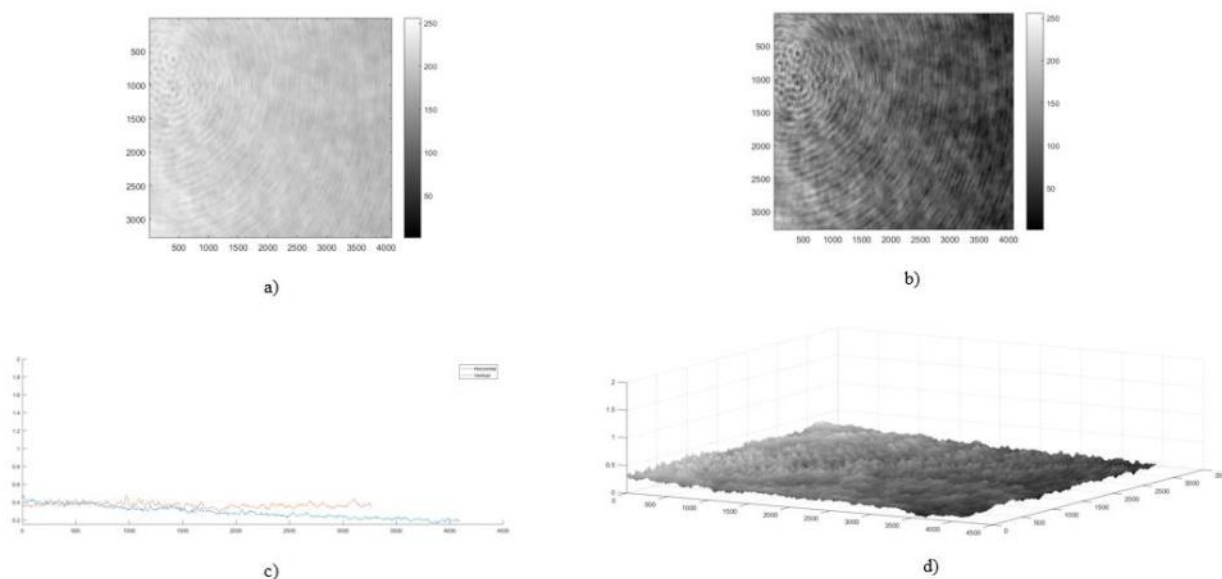


Рисунок 3.18 Результат для нахилу 5 нанорад, введенного в систему за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, в) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка.

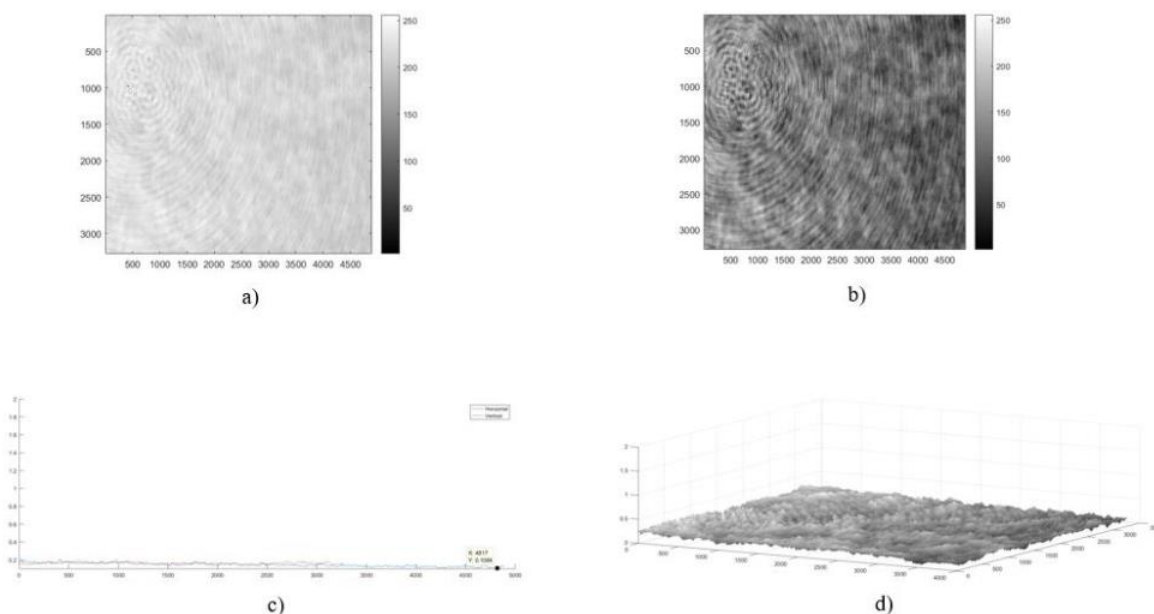


Рисунок 3.19 Результат для нахилу 2 нанорад, введенного в систему за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, в) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка.

Таблиця 3.1 Похибки вимірювання нахилу

Введено нахил (nrad)	Фаза вимірювання (макс-мін)	Розмір зображення (пікселі)	Виміряний нахил (nrad)	Похибка (nrad)
1000	41.8	3820x4896	4055.8	0,3
500	20.84	3820x4896	2022	0,1
400	16.68	3820x4896	1618.6	0.1
300	12.46	3820x4896	1209	0,1
200	8.36	3820x4896	811.2	0,2
100	4.16	3820x4896	403.6	0,1
50	2.08	3820x4896	201.8	0,1
10	0.42	3820x4896	40.56	0,2
5	0.20	3820x4896	20.2	0,1
2	0.08	3820x4896	8.4	0,1

Результати порівняння вимірювання нахилу з введеним нахилом за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву показують дуже хорошу відповідність у межах експериментальної похибки. Результати дослідження зведено в таблицю 3.1. Максимальну фазу вимірювали для кожного нахилу, а виміряний нахил розраховували шляхом перетворення фази на відстані хвильового фронту в довжині хвилі. Потім нахил визначали за кількістю пікселів і розміром пікселя датчика. Коефіцієнт збільшення не впливає на кути нахилу, визначені нахиломіром. На графіку на рисунку 3.20 показані результати виміряного та введеного нахилу в нахиломірі з одним відбиттям. Вимірювання нахилу також виконується від 1,00 рад до 2 нанорад шляхом оцінки фази.

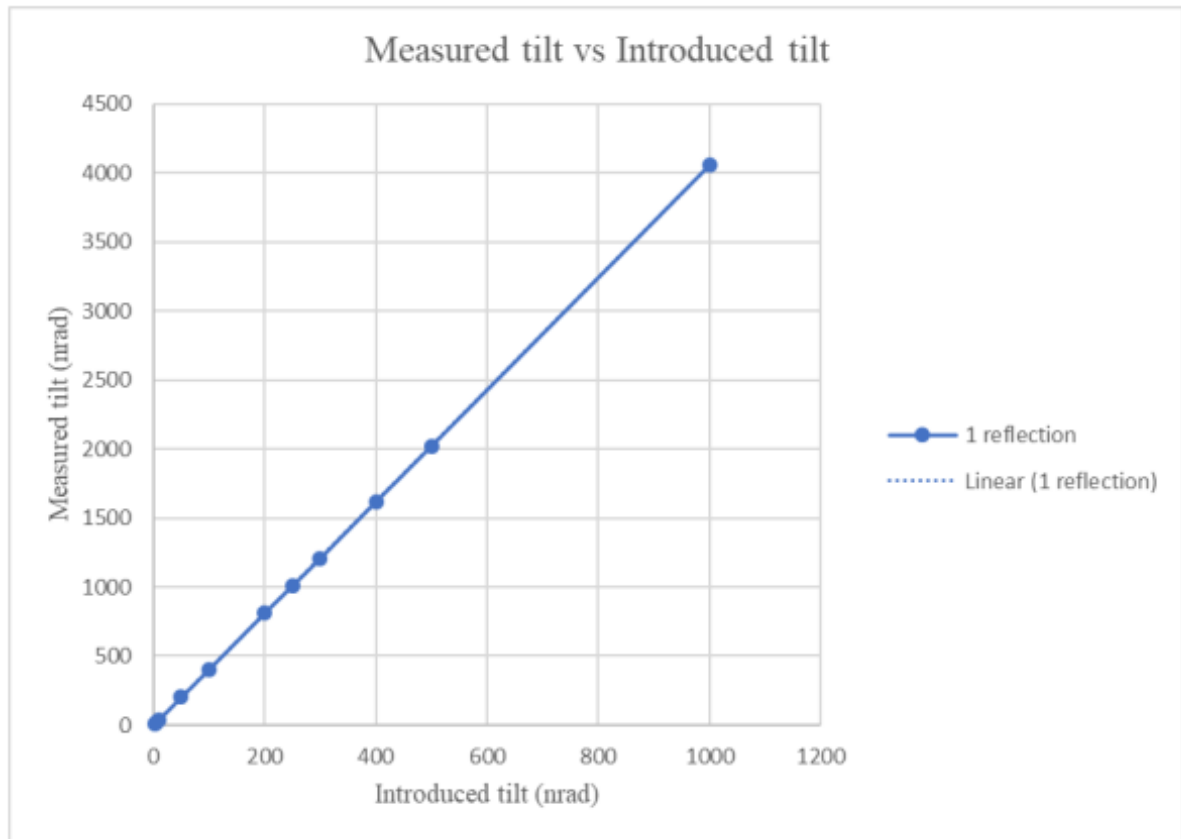


Рисунок 3.20 – Порівняння вимірювань нахил (nrad) з введеним нахилом (nrad)

Середня похибка для цих вимірювань становить 0,2 нанорад. Похибка в цих експериментах основана на визначенні фази в кожній точці за допомогою чотирифазного крокового методу. Додаткова похибка у значенні фази також може бути викликана шумом при генерації фазових карт.

3.2 Кількісне вимірювання за допомогою методу диференціювання країв

Однією з проблем, з якою можна зіткнутися при використанні методу чотирифазної ступінчастої поляризації, є те, що видимість смуг не є постійною. Це може статися, якщо вісь чвертьхвильової пластини не розташована під кутом 45 градусів по відношенню до стану поляризації падіння. Це призводить до того, що промінь, що виходить з чвертьхвильової пластини, буде еліптично поляризованим. При введенні фазових ступенів обертанням напівхвильової пластини, два променя, таким чином, призведуть до різних амплітуд. Коли це станеться, то видимість смуг

при введенні серії фазового кроку $\pi/2$ не буде постійною. Це створить брижі вищого порядку на фазових картах і, отже, внесе помилки.

Тому був запропонований метод фазової диференціації, за допомогою якого при розрахунку фази виключається ефект зміни видимості. У цьому методі потрібні лише два зображення смуг, де між двома зображеннями є фазовий крок $\pi/2$.

Тут Δx , що використовується для виділення нахилу, визначається кількістю бахром і зазвичай становить $1/4$ ширини бахром. Як тільки це було досягнуто, фазові карти та тривимірний графік нахилу були створені за допомогою рівняння (2.24) або (2.37). При ретельному вирівнюванні вздовж осі x , y та z підтримувалася рівномірна видимість смуг. Таким чином, рівняння (2.24) було використано для фазових розрахунків. На наступному рисунку показано цей результат.

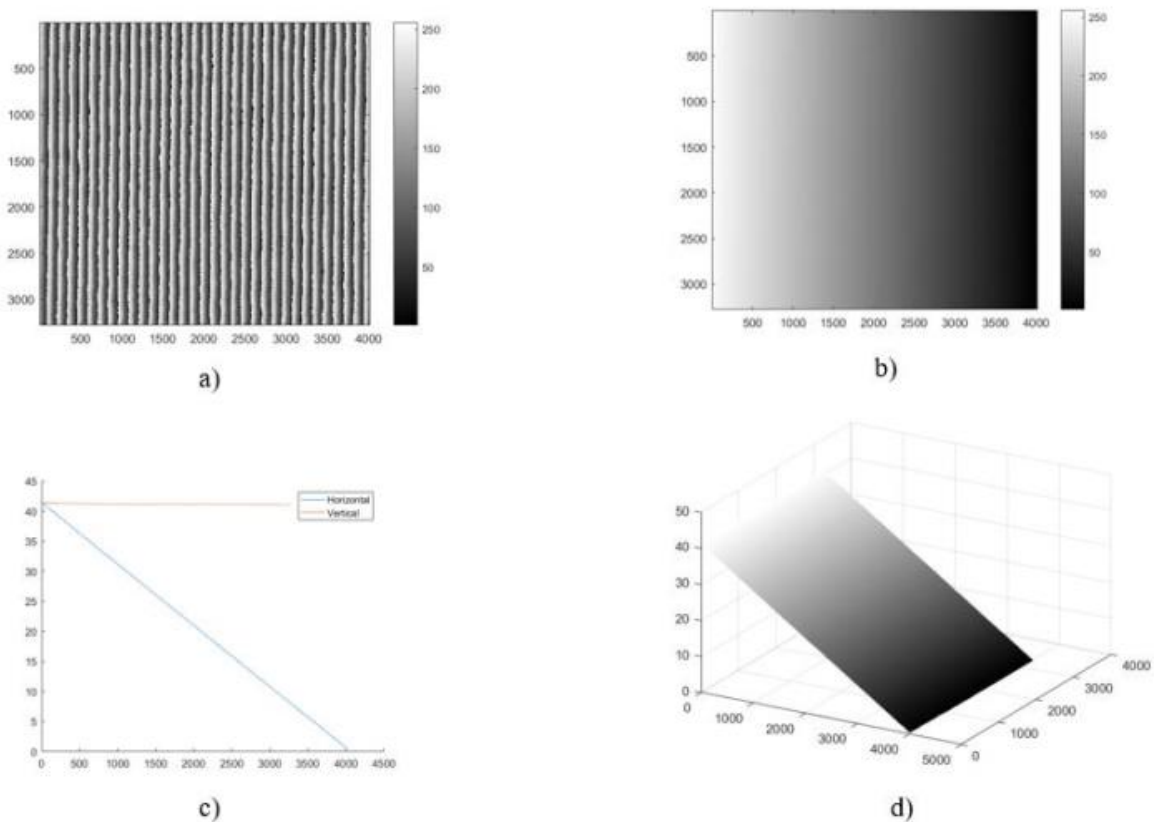


Рисунок 3.21 - Результати для нахилу 1000 нанорад, введенного в систему за допомогою методу фазового диференціювання, а) необроблене зображення

інтерференційної картини, b) фазова карта, c) 2D розгорнута фазова діаграма і d) 3D нерозгорнутий фазовий графік.

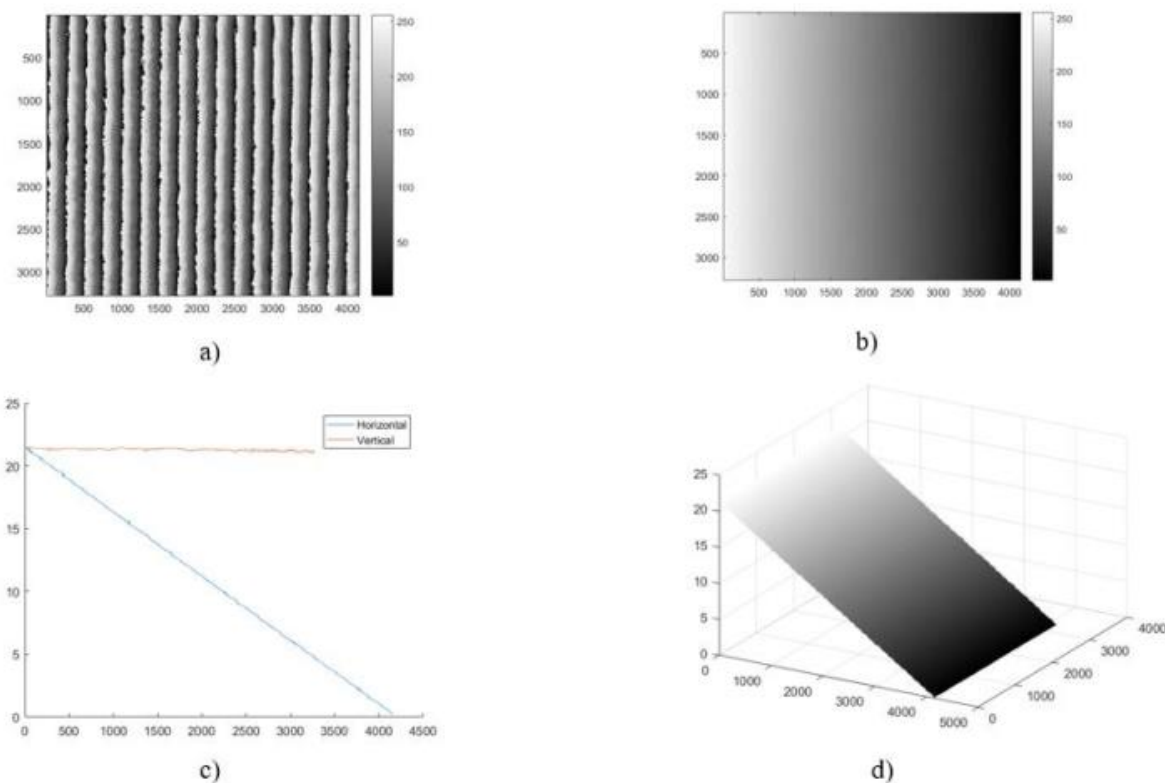


Рисунок 3.22 - Результати для нахилу 500 нанорад, введенного в систему за допомогою методу фазового диференціювання, а) необроблене зображення інтерференційної картини, b) фазова карта, c) 2D розгорнута фазова діаграма і d) 3D нерозгорнутий фазовий графік.

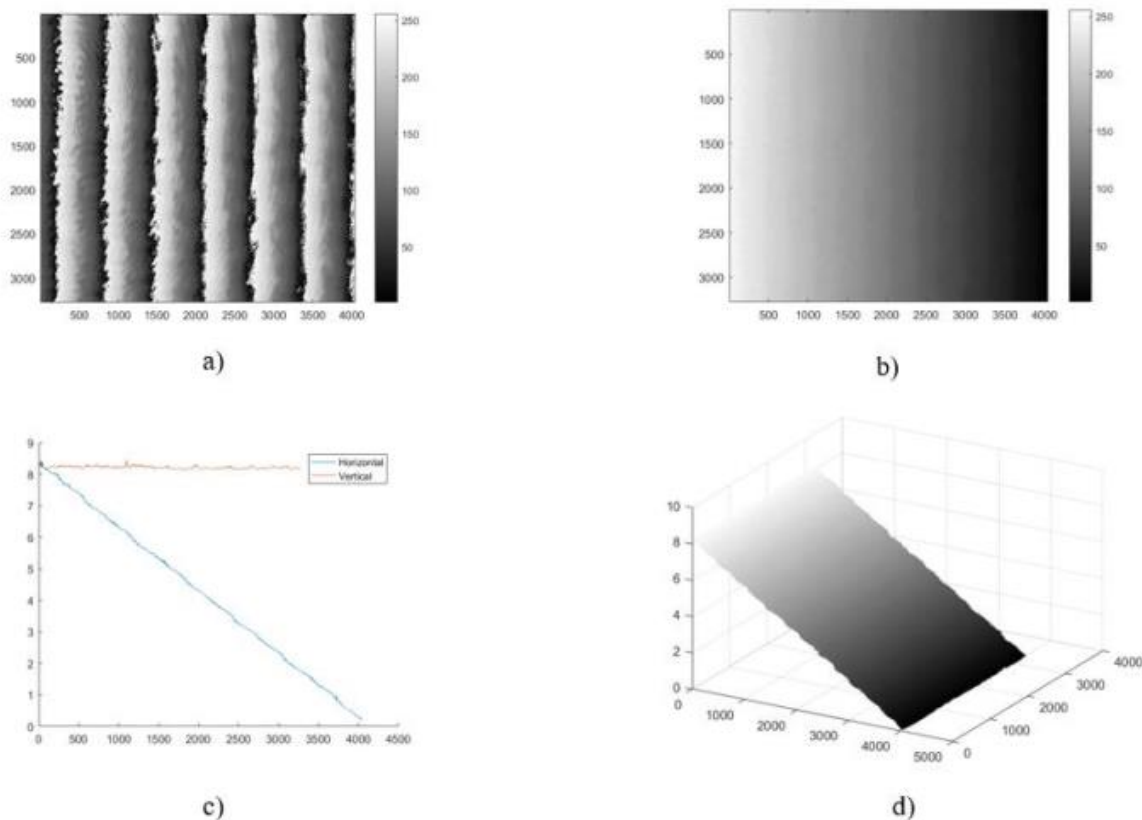


Рисунок 3.23 - Результати для нахилу 200 нанорад, введенного в систему за допомогою методу фазового диференціювання, а) необроблене зображення інтерференційної картини, б) фазова карта, с) 2D розгорнута фазова діаграма і d) 3D нерозгорнутий фазовий графік.

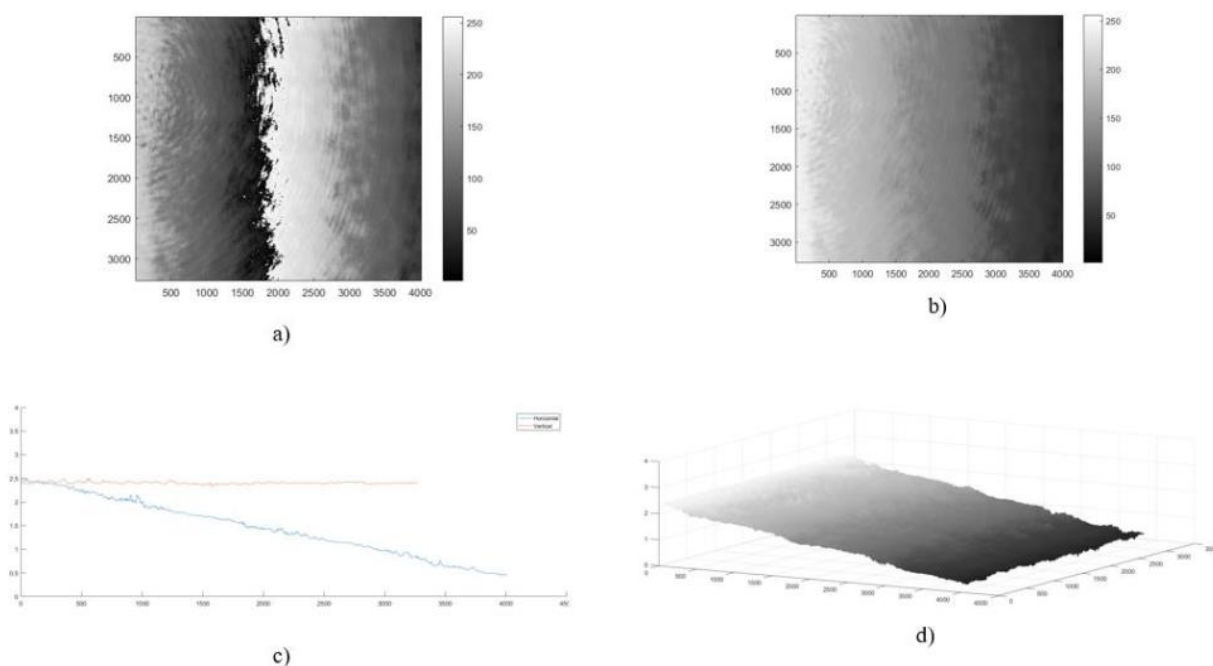


Рисунок 3.24 - Результати для нахилу 50 нанорад, введенного в систему за допомогою методу фазового диференціювання, а) необроблене зображення

інтерференційної картини, b) фазова карта, c) 2D розгорнута фазова діаграма і d) 3D нерозгорнутий фазовий графік.

Як показано в таблиці 3.2, результати порівняння вимірюного нахилу з введеним нахилом за допомогою методу фазового диференціювання показують дуже хорошу відповідність. Максимальну фазу вимірювали для кожного нахилу, а потім обчислювали вимірний нахил. Графік на рисунку 3.25 показує, що метод фазового диференціювання має більш точні результати. В деяких точках зменшення похибки вимірювань становить 1,5 – 2 рази.

Таблиця 3.2 Похибка вимірювань за допомогою методу фазового диференціювання.

Введено нахил (nrad)	Фаза виміряна (макс-мін)	Розмір зображення (пікселі)	Вимірний нахил (nrad)	Похибка (nrad)
1000	41.46	3820x4896	4022	0,1
500	20.68	3820x4896	2006.6	0,1
200	8.32	3820x4896	807.2	0,2
50	2.06	3820x4896	200.2	0,1

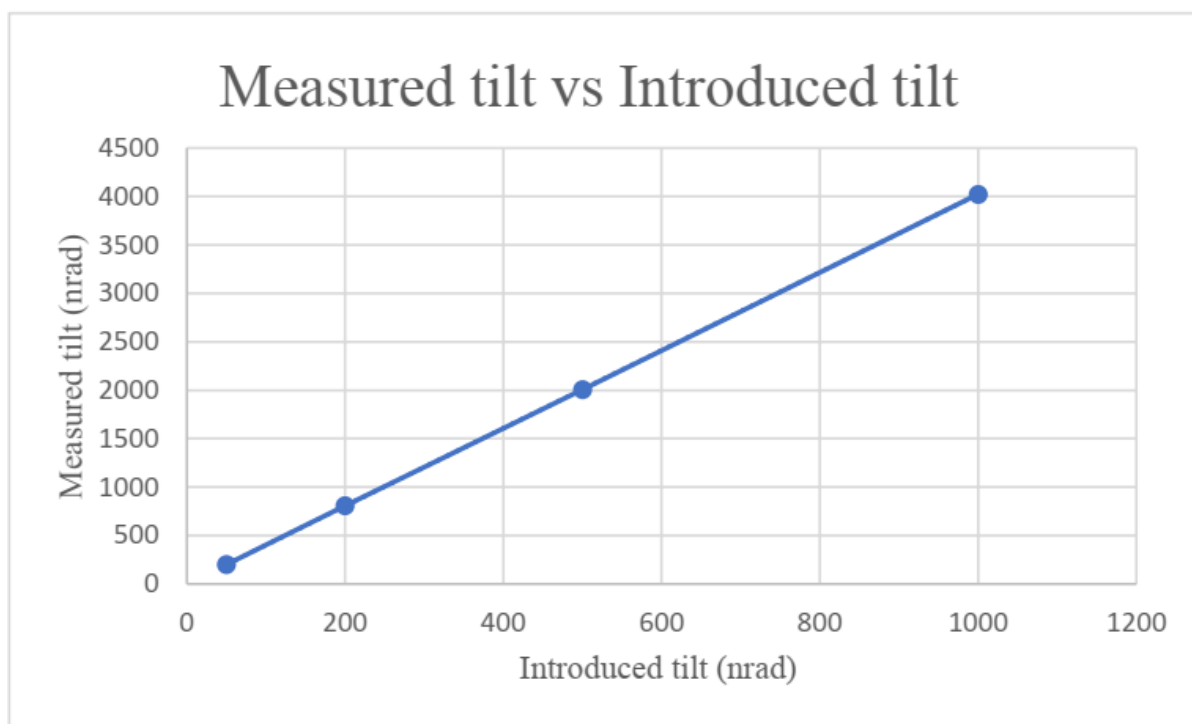


Рисунок 3.25 Порівняння виміряного нахилу (nrad) з введеним нахилом (nrad) за допомогою методу фазового диференціювання

Розглянемо плоске квадратне дзеркало M4 розмірами 50x50 мм, як показано на рисунку 3.26.

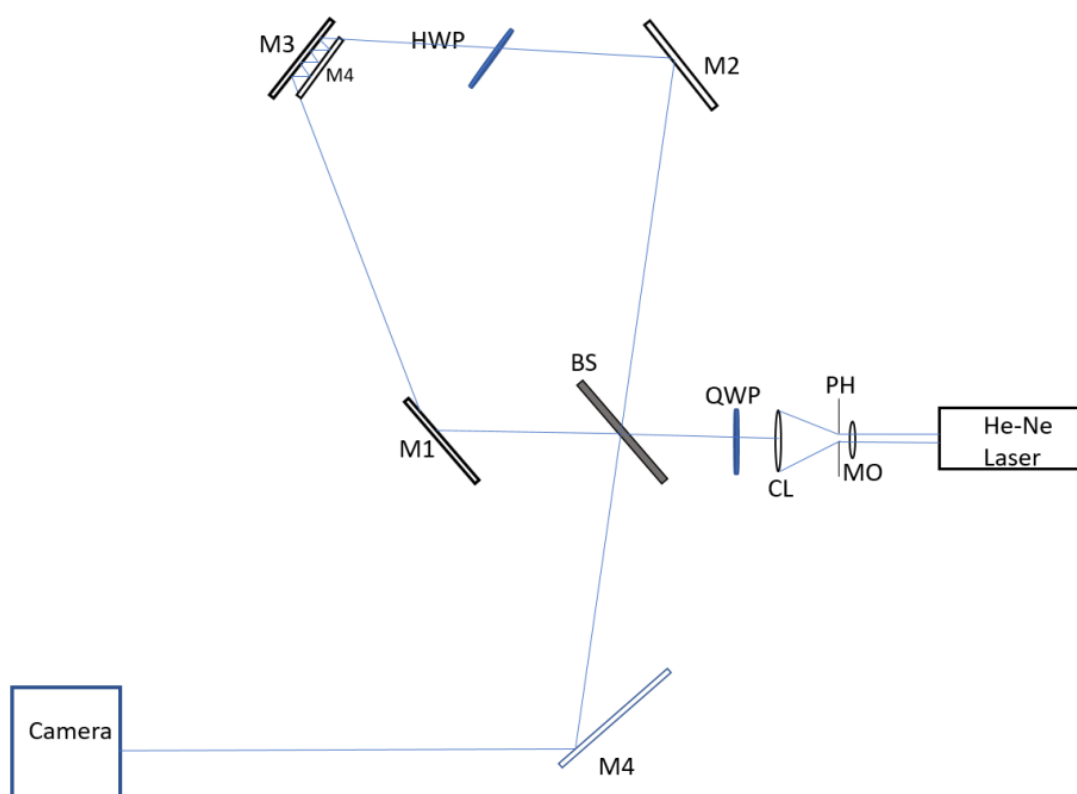


Рисунок 3.26. Схема нахиломіра для додавання множинних відбиттів (М4 — нахилене дзеркало).

Відстань між М3 і М4 встановлено на рівні 8 мм, а довжина М4 (нахиленого дзеркала) становить 50 мм. Ця геометрія дозволяє для кута падіння на межі розділу дзеркала М3 становити 38° , і, таким чином, чотири відбиття можуть бути розміщені з цією геометрією з двома дзеркалами. Параметри було налаштовано, щоб переконатися, що виникла найменша кількість дифракції від країв дзеркал. Результати для 4 відображень, введених на М4, показані нижче. У таблиці 3.3 наведено порівняння введених нахилу з виміряним нахилом за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву та множинних відбиттів.

$$N = \frac{1}{2d} \cdot \frac{L}{\tan(\theta)}$$

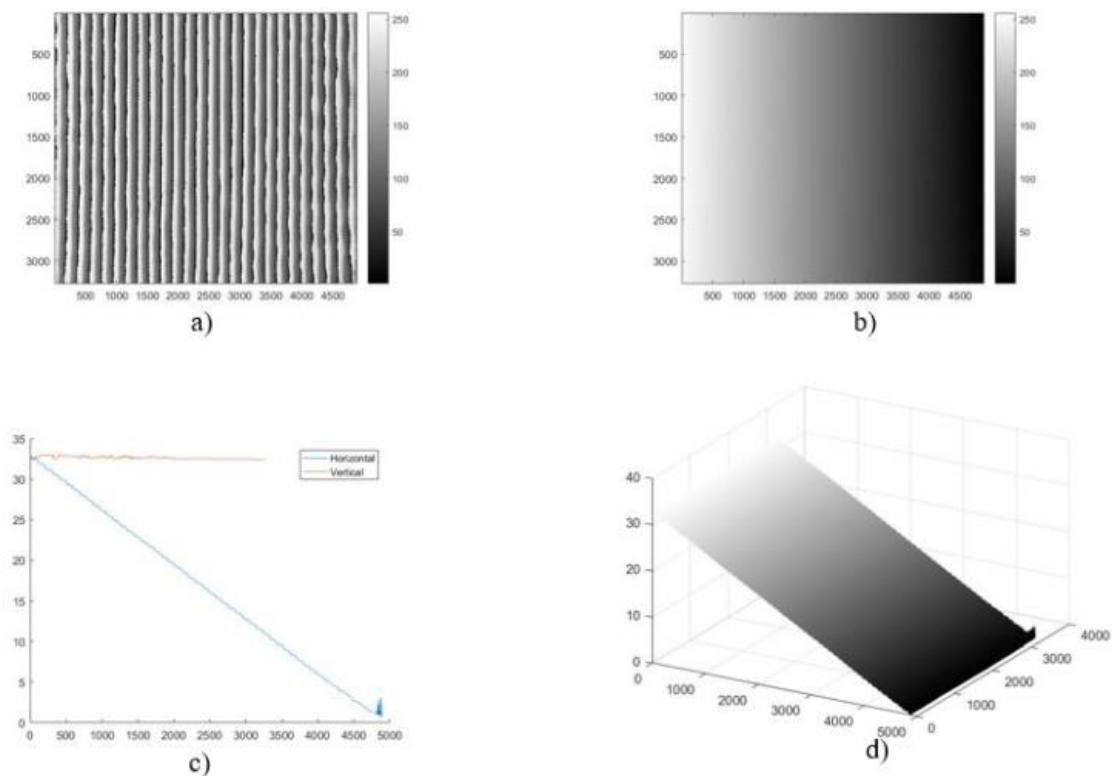
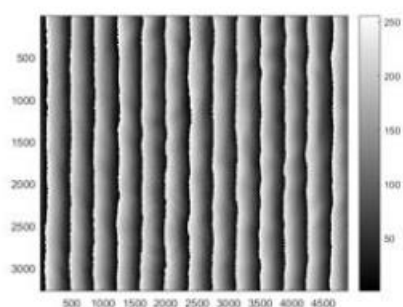
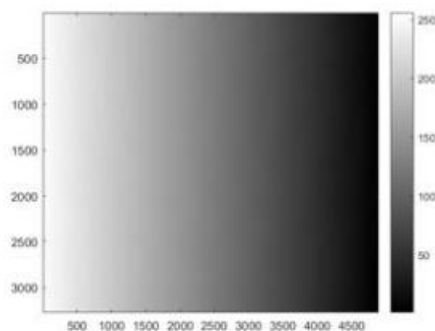


Рисунок 3.27 Результати для нахилу 200 нанорад, введенного в систему з кількома відображеннями за допомогою чотиріетапного методу фазового

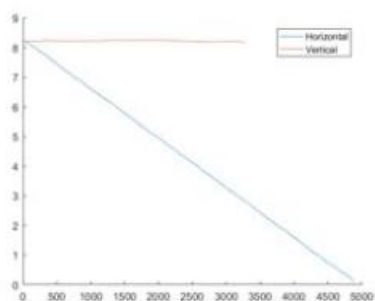
зсуву, а) необроблене зображення інтерференційної картини, б) фазова карта, в) 2D розгорнутий фазовий графік і d) 3D розгорнутий фазовий графік.



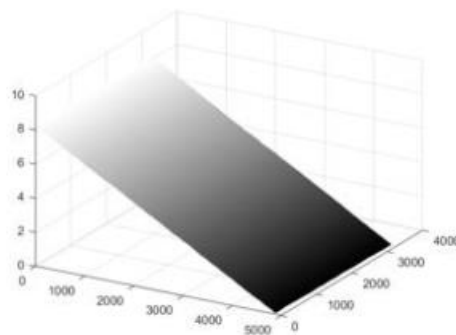
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.28 Результати для нахилу 100 нанорад, введенного в систему з кількома відображеннями за допомогою чотириетапного методу фазового зсуву, а) необроблене зображення інтерференційної картини, б) фазова карта, в) 2D розгорнутий фазовий графік і d) 3D розгорнутий фазовий графік.

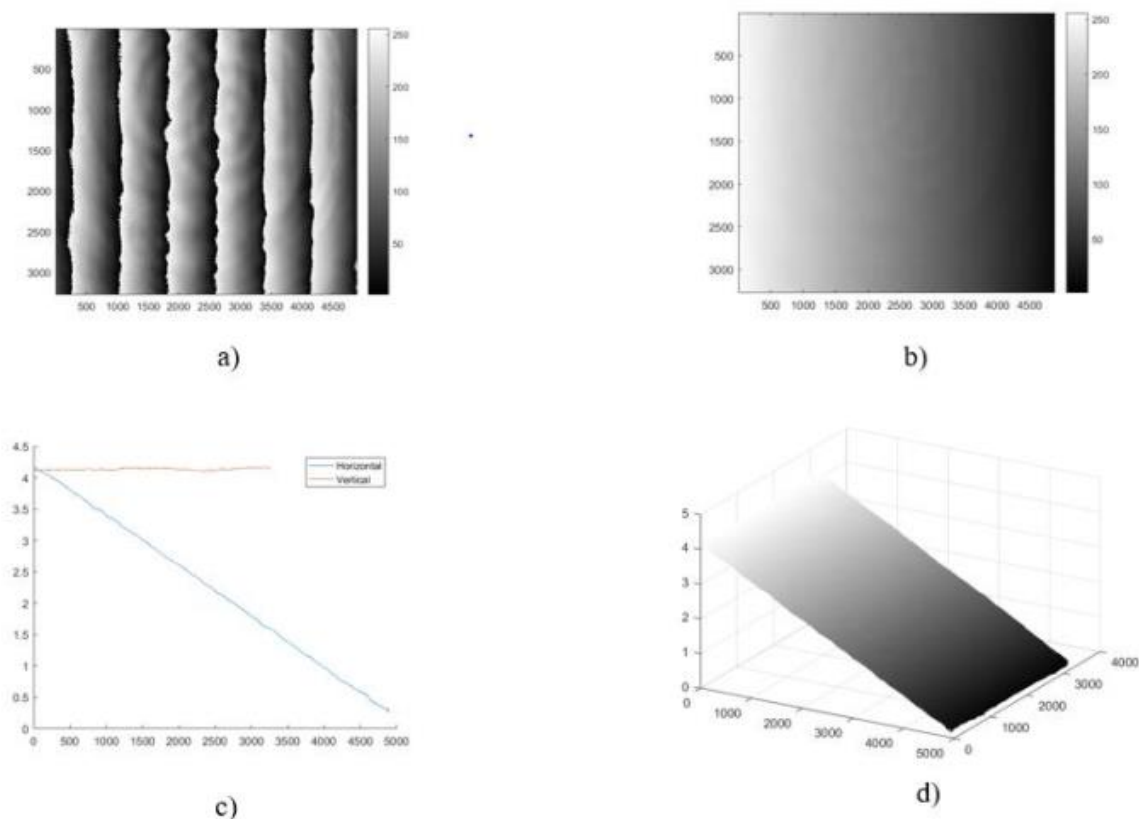


Рисунок 3.29 Результати для нахилу 50 нанорад, введенного в систему з кількома відображеннями за допомогою чотириетапного методу фазового зсуву, а) необроблене зображення інтерференційної картини, б) фазова карта, в) 2D розгорнутий фазовий графік і д) 3D розгорнутий фазовий графік.

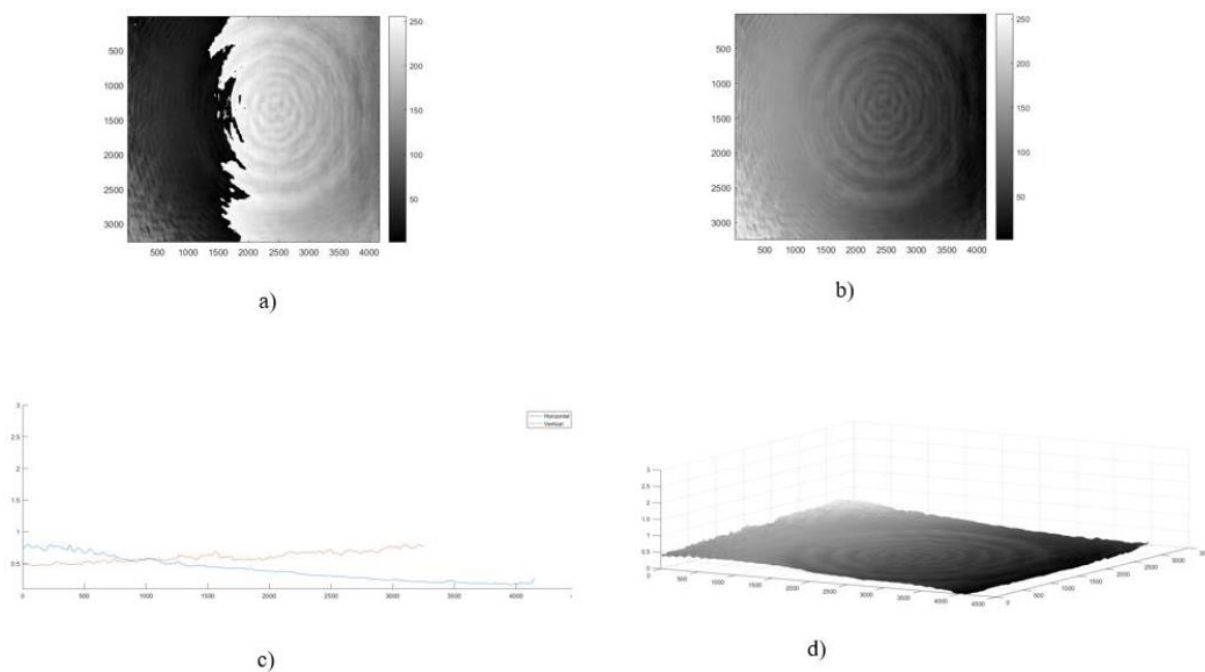


Рисунок 3.30 Результати для нахилу 10 нанорад, введенного в систему з кількома відображеннями за допомогою чотириетапного методу фазового

зсуву, а) необроблене зображення інтерференційної картини, б) фазова карта, в) 2D розгорнутий фазовий графік і d) 3D розгорнутий фазовий графік.

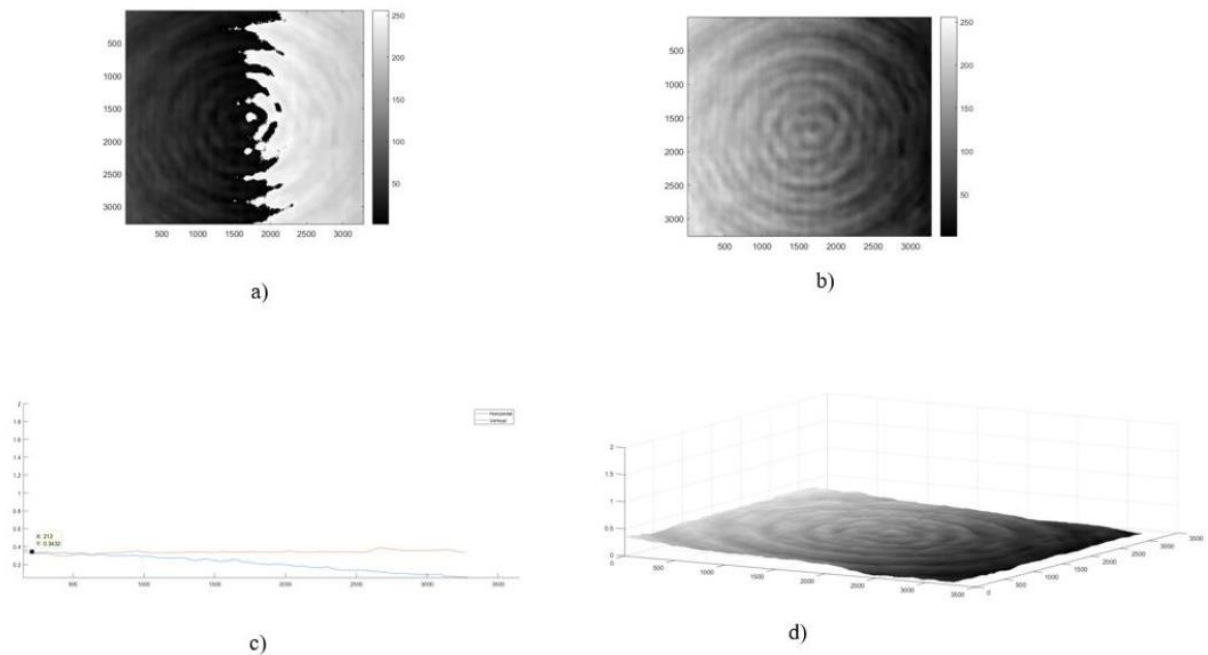


Рисунок 3.31 Результати для нахилу 2 нанорад, введенного в систему з кількома відображеннями за допомогою чотириетапного методу фазового зсуву, а) необроблене зображення інтерференційної картини, б) фазова карта, в) 2D розгорнутий фазовий графік і d) 3D розгорнутий фазовий графік.

Таблиця 3.3 Похибка вимірювань нахилу.

Введено нахил (nrad)	Фаза виміряна (макс-мін)	Розмір зображення (пікселі)	Виміряний нахил (nrad)	Похибка (nrad)
200	33.01	3820x4896	3204	0,1
100	16.56	3820x4896	1606.8	0,1
50	8.32	3820x4896	807.2	0,1
10	1.62	3820x4896	161	0,1
5	0.868	3820x4896	84.2	0,1
2	0.33	3820x4896	32.2	0,1

Аналіз даних, наведених в таблиці 3.3 і рисунку 3.32, нахил графіка для множинних відбиттів множитья на 4, оскільки на похилому дзеркалі було 4 відбиття, що узгоджується з теорією яка неведена в розділі 2.

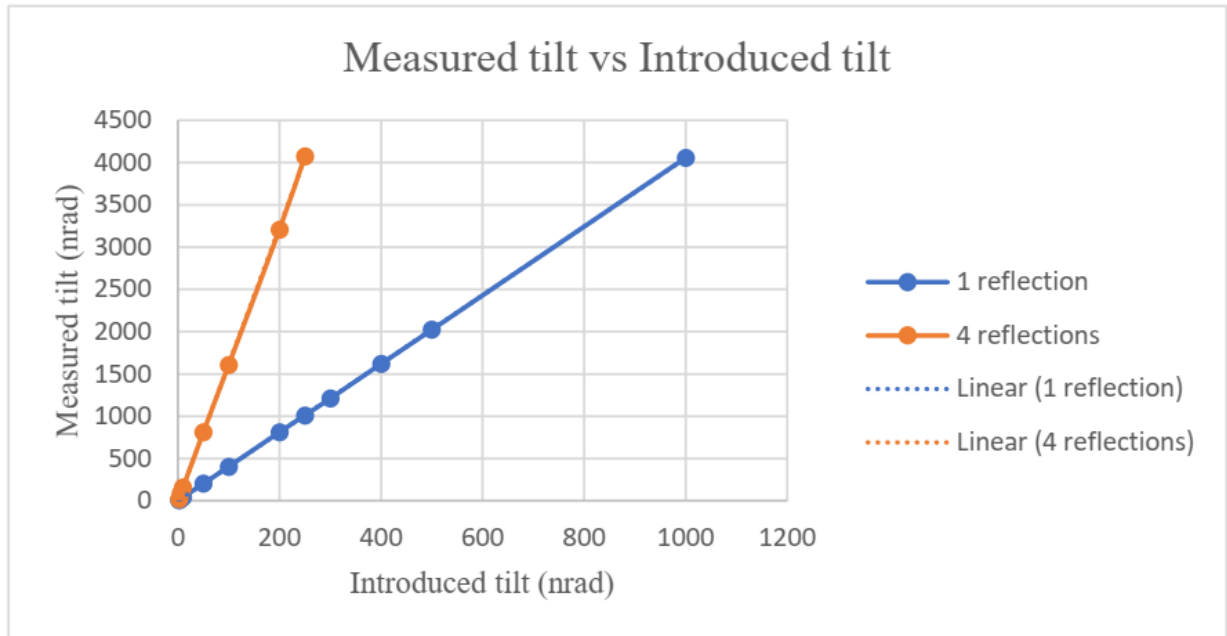
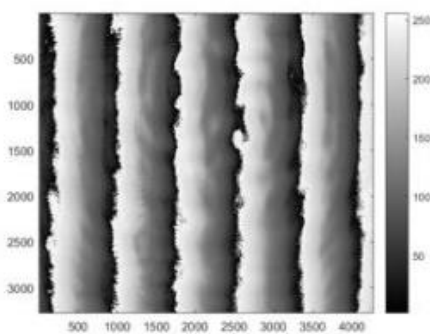
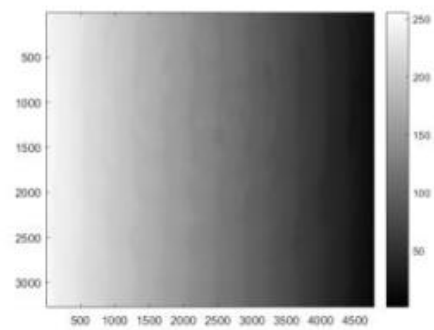


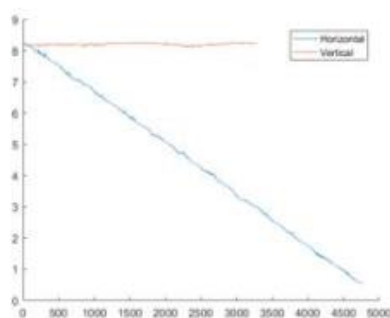
Рисунок 3.32. Порівняння виміряного нахилу та введенного нахилу для 1 та 4 відбиттів за допомогою чотириступінчастого методу фазового зсуву



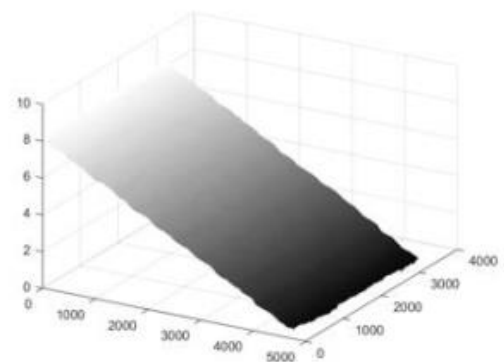
a)



b)

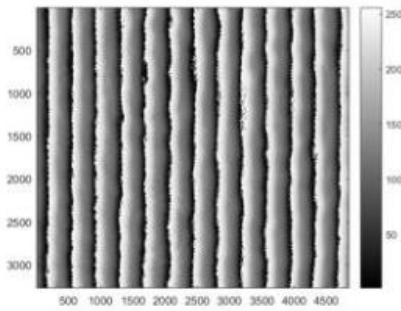


c)

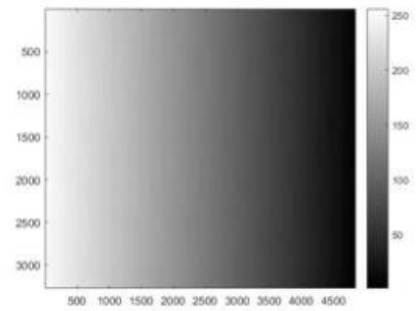


d)

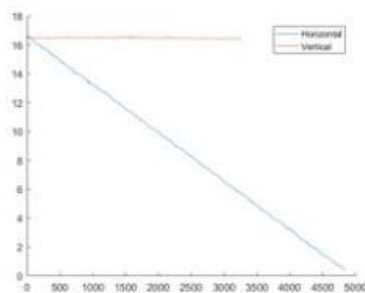
Рисунок 3.33 Результати для нахилу 50 нанорад, введенного в систему за допомогою методу фазової диференціації з множинними відбиттями, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, с) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка



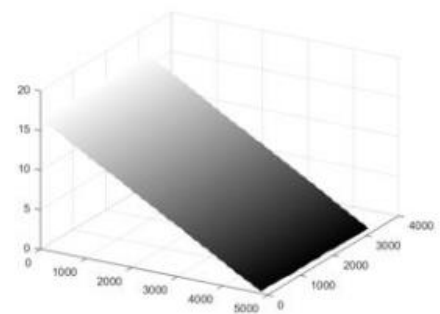
a)



b)

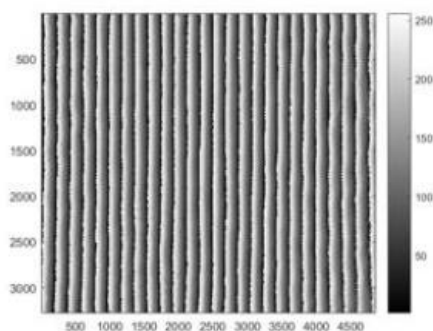


c)

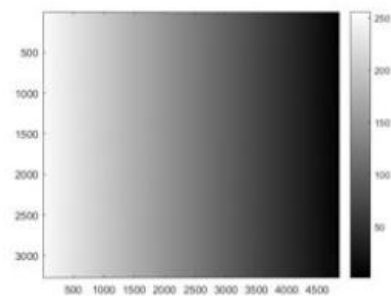


d)

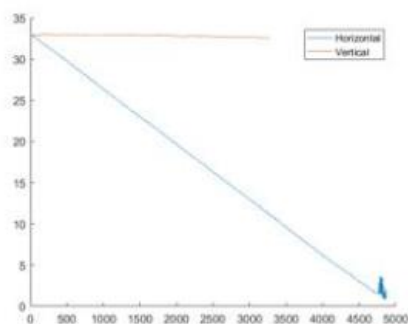
Рисунок 3.34 Результати для нахилу 100 нанорад, введенного в систему за допомогою методу фазової диференціації з множинними відбиттями, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, с) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка



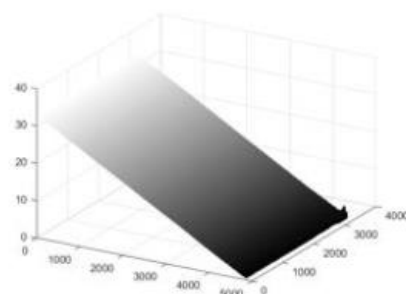
a)



b)



c)



d)

Рисунок 3.35 Результати для нахилу 200 нанорад, введенного в систему за допомогою методу фазової диференціації з множинними відбиттями, а) необробленого зображення інтерференційної картини, б) фазової карти, с) 2D нерозгорнутого фазового графіка і d) 3D нерозгорнутого фазового графіка

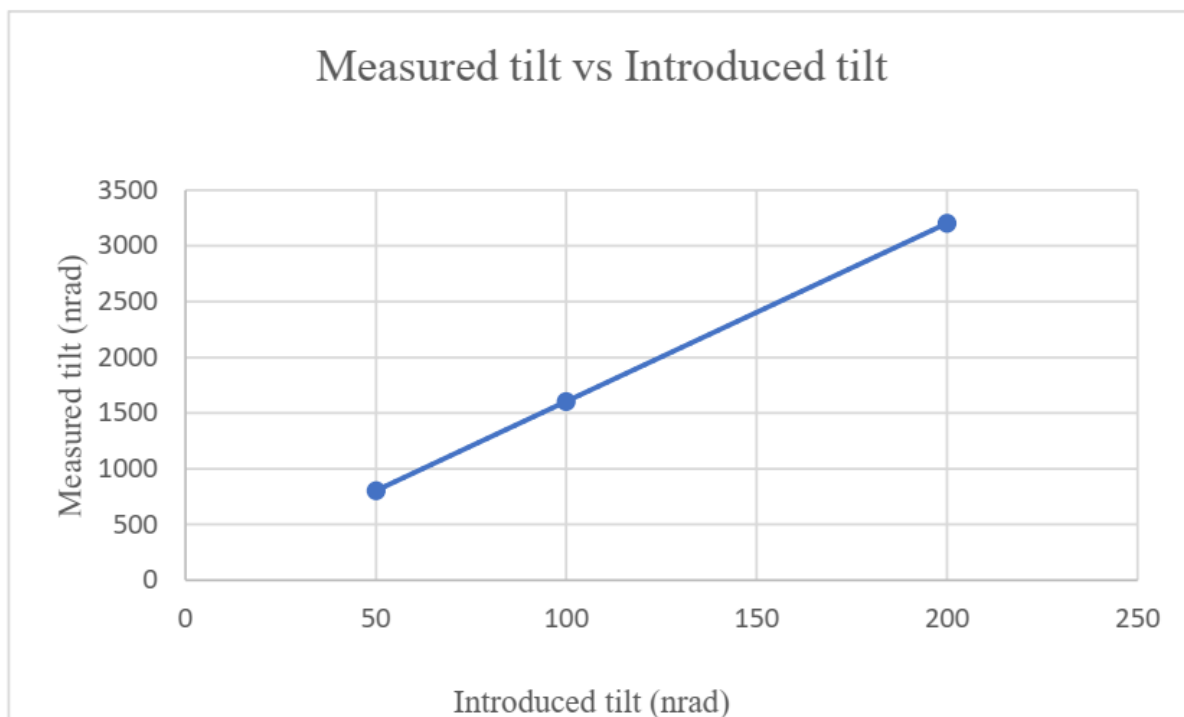


Рисунок 3.36 Виміряна залежність від введенного нахилу за допомогою методу фазового диференціювання з множинними відбиттями.

У таблиці 3.4 наведено виміряний і розрахований нахил за допомогою методу фазового диференціювання, як показано в результатах для системи без багаторазових відображень, цей метод є більш точним відповідно до нахилу підігнаних ліній до точок даних, рис. 4.33 і Рис. 4.36.

Таблиця 3.4 Похибка вимірювань нахилу.

Введено нахил (nrad)	Фаза виміряна (макс-мін)	Розмір зображення (пікселі)	Виміряний нахил (nrad)	Похибка (nrad)
200	33.02	3820x4896	3204	0,1
100	16.54	3820x4896	1604.8	0,1
50	8.28	3820x4896	804.4	0,1

Висновки до розділу: Кути нахилу від 2 нрад були виміряні з високою точністю та чутливістю. Для цього було використано простий метод поляризаційного зсуву фази для вимірювання таких малих кутів.

Метод поляризації використовує лише одну чвертьхвильову та одну півхвильову пластину на відміну від інших методів, запропонованих у літературі. Використання кількох компонентів забезпечує меншу потребу в якості променя після проходження через кожен оптичний компонент. При оцінці фази за допомогою методу фазового кроку використовували чотирифазний крок і метод фазової диференціації.

Використання методу диференціації є доцільним, оскільки для зйомки потрібно лише два зображення, на відміну від чотирифазного крокового методу, який вимагає чотирьох зображень.

Щоб ввести поляризаційний фазовий зсув, перед BS використовувалася чверть хвильова пластина, щоб перетворити світлополяризоване лінійно в світлополяризоване по колу. В одному з плечей інтерферометра для зсуву фази використовувалася напівхвильова пластина. Варто зазначити, що для чотириступінчастого методу фазового зсуву було знято чотири зображення з кроком $22,5^\circ$.

Результати цієї методики показують, що циклічний інтерферометр можна використовувати для вимірювання нахилу об'єкта в нанорозмірній області. Додатковою перевагою циклічного інтерферометра є те, що два зустрічні промені проходять ідентичні шляхи, і, таким чином, інтерферометр нечутливий до зовнішніх коливань і турбулентності. У циклічний інтерферометр було введено кілька відображень, щоб покращити можливість вимірювання нахилу. Використовуючи два дзеркала, які розташовані паралельно один одному, промені змогли пройти чотири множинні відбиття, перш ніж об'єднатися в

BS. Таким чином, мінімальний нахил кут, який вимірюється, був зменшений на кількість множинних відображень. Таким чином, був виміряний нахил до 0,2 нанорадіана або 10^{-5} кутових секунди.

ВИСНОВКИ

При виконанні роботи було виконано:

1. Аналіз літературних джерел.
2. Розробку математичної моделі роботи оптичного нахиломіра.
3. Дослідження характеристик оптичного нахиломіра.

Результати досліджень показують, що метод поляризації є кращим, оскільки потребує лише однієї чвертьхвильової та однієї півхвильової пластини на відміну від інших існуючих методів. Використання кількох компонентів забезпечує меншу потребу в якості променя після проходження через кожен оптичний компонент. При оцінці фази за допомогою методу фазового кроку використовували чотирифазний крок і метод фазової диференціації.

Кути нахилу від 2 нрад були виміряні з високою точністю та чутливістю. Похибка була низькою - 0,1 нанорадіана.

Перелік використаних літературних джерел

1. Brown, David, and Hamilton III, E.P., 1984, Electromechanical Energy Conversion, Macmillan Publishing Co., pp. 12-51.
2. Cooper, W.D., and Helfrick, A.D., 1985, Electronic Instrumentation and Measurement Techniques, Prentice-Hall, pp. 110-141, 353-359.
3. Fiore, J.M., 1992, Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits: Theory and Applications, West Publishing Co., pp. 87-119, 126-155..
4. Hughes, T.J., 1993, "A Spin on Torque Measurement," Mechanical Engineering Magazine, Vol. 24, No. 1, pp. 33-35.
5. Kennedy, T.C., 1994, personal communication.
6. Lemaitre, J., and Chaboche, J.L., 1990, Mechanics of Solid Materials, Cambridge University Press, pp. 41-53.
7. Mooney, W.J., 1991, Optoelectronic Devices and Principles, Prentice Hall, pp. 210-242.
8. O'Shea, D.C., 1977, An Introduction to Lasers and their Applications, AddisonWesley Publishing Co., pp.1-3,5-23
9. Pallas-Areny, R., and Webster,J.G., 1991, Sensors and Signal Conditioning, John Wiley & Sons, pp. 41-72.
10. Palm III, W.J., 1983, Modeling, Analysis, and Control of Dynamic Systems. John Wiley & Soncs, pp. 5-92, 117-144.
11. Pantell, R.H., and Puthoff, H.E., 1969, Fundamentals of Quantum Electronics, John Wiley & Soncs, pp. 1-11, 101-121.
12. Plant, T.K., 1994, personal communication. Rosenstark, S., 1986, Feedback Amplifier Principles, Macmillan Publishing Co., pp. 27-37, 80-92.
13. Timoshenko, S., and Young, D.H., 1962, Elements of Strength of Materials, D. Van Nostrand Co., pp. 70-91.
14. Ward, J.P., 1992, Solid Mechanics, Kiuner Academic Publishers, pp. 162-
15. Wilson,J., and Hawkes,J.F.B., 1989, Optoelectronics: An Introduction, Prentice Hall, pp. 1-10, 216-242.
16. Yariv, A., 1985, Optical Electronics, Holt, Rinehart, and Wilson, pp. 148-187.

17. Іванов А.Б. "Оптико-електронні методи вимірювання нахилів". – Київ: Видавництво "Наука", 2017. – 320с.
18. Головка Д. Б. Основи метрології та вимірювань: підручник. / Д. Б. Головка, К. Г. Рего, Ю. О. Скрипник. – К.: Либідь, 2001. – 408 с.
19. Кованько В. В. Загальнотехнічні вимірювання та прилади. Навчальний посібник / В. В. Кованько, В. В. Древецький, А. О. Христюк. – Рівне: НУВГП, 2013. – 189 с.
20. Головка Д. Б. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин / Д. Б. Головка, Ю. О. Скрипник, О. П. Яненко. – К.: Либідь, 2004. – 328 с.
21. Литвиненко В.М. "Сучасні оптико-електронні системи в нахиломіруванні". – Харків: Видавництво "Ранок", 2018. – 280с.
22. Дмитренко І.П. "Геометричні та оптичні методи вимірювання нахилів". – Львів: Видавництво "Світ", 2019. – 350с.
23. Сидоренко В.К. "Дослідження оптико-електронних систем нахиломірування". – Чернівці: Видавництво ЧНУ, 2021. – 325с.
24. Готра З. Ю. Фізичні основи електронної техніки: Підручник / З. Ю. Готра, І. Є. Лопатинський, Б. А. Лук'янець, З. М. Микитюк, І. В. Петрович. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2004. – 880 с.
25. Вуйцік В. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науковонавчальне видання. В 3 томах. Том 3. Книга 1 / В. Вуйцік, З. Ю. Готра, О. З. Готра, В. В. Григор'єв, В.Каліта, О. М. Мельник, Є. Потенцкі, В. В. Черпак: За ред. З. Ю.Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2007. – 249 с.

26. Вуйцік В. Мікроелектронні сенсори фізичних величин:
Науковонавчальне видання. В 3 томах. Том 3. Книга 2 / В. Вуйцік, З. Ю
Готра, О. З. Готра, В. В. Григор'єв, В.Каліта, О. М. Мельник, Є.
Потенцкі, В. В. Черпак: За ред. З. Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2007. –
367 с.
27. Корнійчук В. І. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та
мережі / В. І. Корнійчук, П. Д. Мосорін. – Одеса: Друк, 2001. – 364 с.
28. Р. Фриман Волоконно-оптические системы связи – М.: Техносфера,
2003. – 590 с.