

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

*На правах рукопису*

**Хома Анна Володимирівна**

УДК 004.942: 681.787

**Методи та засоби комп'ютерного опрацювання сигналів інтерферометрії  
білого світла**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Наукові керівники:  
доктор технічних наук, dr.h.c, професор  
Богдан Стадник,  
доктор технічних наук, професор  
Ебергард Манске

*Ідентичність всіх примірників дисертації*

**ЗАСВІДЧУЮ:**

*Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради*

*/ Я. Луцик /*

Львів-2017

## Зміст

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОМП'ЮТЕРНИХ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТОПОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ .....	14
1.1. Технології контролю топології поверхні.....	14
1.2. Особливості дослідження топології поверхні за допомогою інтерферометрії білого світла .....	15
1.3. Сфери використання інтерферометрів білого світла.....	20
1.4. Огляд відомих методів опрацювання сигналів інтерферометрії білого світла в комп'ютерних системах контролю топології поверхні.....	23
1.5. Формування напрямків подальших теоретичних і експериментальних досліджень.....	28
Висновки до 1 розділу .....	29
РОЗДІЛ 2 КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ РЕЄСТРАЦІЇ ТА ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ БІЛОГО СВІТЛА .....	31
2.1. Комп'ютерна система реєстрації і опрацювання інтерферограм білого світла	31
2.2. Модель вимірювального каналу комп'ютерної інтерферометричної системи	36
2.3. Особливості реконструкції топології поверхні із інтерферограми білого світла . .....	39
2.4. Методика оцінювання обчислювальної ефективності та точності розроблених методів реконструкції топології поверхні .....	43
Висновки до 2 розділу .....	50
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ПРОФІЛЮ ПОВЕРХНІ КОМП'ЮТЕРНИМИ ЗАСОБАМИ.....	52
3.1. Метод реконструкції профілю поверхні із фази сигналу інтенсивності інтерферограми, унормованого інтерпольованою огинаючою амплітуди .....	53

3.1.1. Визначення інформативного параметра із фази несучої сигналу інтенсивності інтерферограми .....	54
3.1.2. Оцінювання огинаючої амплітуди сигналу інтенсивності інтерферограми методом інтерполяції.....	62
3.1.3. Унормування несучої частоти сигналу інтенсивності .....	64
3.1.4. Реконструкція профілю поверхні із сигналу інтенсивності інтерферограми, унормованого інтерпольованою огинаючою амплітуди .....	67
3.2. Метод посегментної апроксимації .....	71
3.3. Метод реконструкції профілю поверхні на основі моделі Проні .....	78
3.3.1. Модель Проні та її застосування для розкладу сигналу на комплексні експоненти.....	78
3.3.2. Адаптація сигналу інтерферограми до моделі Проні.....	80
3.3.3. Реалізація методу Проні для інтерферограми білого світла та оцінювання його обчислювальної ефективності .....	82
3.3.4. Реконструкція профілю лінійної поверхні на основі моделі Проні та дослідження похибок для різних кутів нахилу .....	85
3.3.5. Реконструкція профілю сферичної поверхні на основі моделі Проні та дослідження похибок для різної кривизни .....	86
3.4. Реконструкція поверхні на основі моделі аналітичного сигналу.....	88
3.5. Метод реконструкції профілю поверхні із огинаючої амплітуди аналітичного сигналу.....	91
3.6. Метод реконструкції профілю поверхні із нормалізованого за Гільбертом сигналу інтерферограми .....	97
3.7. Метод реконструкції профілю поверхні із миттєвої фази аналітичного сигналу інтенсивності інтерферограми .....	100
3.8. Метод реконструкції профілю поверхні із логарифмованого аналітичного сигналу.....	103
Висновки до 3 розділу .....	106

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ТА ЇХ ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ НА СУЧАСНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПЛАТФОРМАХ.....	109
4.1. Адаптація розроблених методів до реконструкції топології поверхні із двовимірного масиву даних та їх порівняльна характеристика .....	109
4.2. Високоєфективний метод підвищення ентропії інтерферограм білого світла	111
4.3. Дослідження методів знешумлення інтерферограми білого світла.....	114
4.3.1. Знешумлення сигналу інтенсивності інтерферограми за допомогою нерекурсивних фільтрів.....	115
4.3.2. Знешумлення сигналу інтенсивності інтерферограми за допомогою вейвлет-перетворення .....	119
4.3.3. Знешумлення інтерферометричного зображення за допомогою вейвлет-перетворення.....	121
4.4. Експериментальні дослідження розроблених методів на реальних інтерферограмах .....	123
4.5. Розроблення та дослідження можливих варіантів апаратної реалізації методів реконструкції топології поверхні .....	129
4.5.1. Апаратна реалізація спецпроцесора опрацювання кадрів CCD-камери ....	129
4.5.2. Приклади апаратної реалізації розроблених методів реконструкції топології поверхні .....	131
4.5.3. Порядок роботи з комп'ютерною інтерферометричною системою на базі розроблених методів.....	133
Висновки до 4 розділу .....	135
ВИСНОВКИ.....	136
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	139
ДОДАТОК А.....	148
ДОДАТОК Б.....	152

• ДОДАТОК Б.1 .....	152
• ДОДАТОК Б.2 .....	155
• ДОДАТОК Б.3 .....	156
ДОДАТОК В .....	160

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У багатьох галузях науки і техніки виникає задача вимірювання параметрів поверхні різноманітних об'єктів, наприклад профілю, шорсткості, тощо. Із вдосконаленням технологій та мініатюризацією виробів підвищуються вимоги щодо точності та швидкодії вимірювання параметрів технологічних процесів, зокрема механічних величин. В останні роки значне зацікавлення викликає інтерферометрія білого світла (ІБС, англ. White Light Interferometry - WLI) для реконструкції топології поверхні. До переваг цієї технології належать відсутність контакту із досліджуваним об'єктом, висока роздільна здатність, можливість контролю поверхонь із різкими перепадами і ухилами, де традиційна монохроматична інтерферометрія не дає достовірних результатів [1,2,3].

Інтерферометрія білого світла, володіючи суб-мікрометровою латеральною роздільною здатністю (вздовж поверхні) та нормальною до площини - нанометровою, є потужним інструментом вимірювання і аналізу поверхонь у широкому діапазоні значень, від кількох мікрометрів до декількох сотень міліметрів. Прикладами використання ІБС є контроль однорідності поверхонь, товщини тонких плівок, якості клинів, увігнутості дзеркал тощо [4,5,6,7,8].

Застосування ширококутового джерела світла замість традиційного лазерного випромінювання дає змогу з високою точністю проводити вимірювання не лише відносних переміщень, а й їх абсолютних значень. Крім того, поєднання ІБС із іншими засобами, наприклад, атомним силовим мікроскопом дає можливість виконувати вимірювання у нанометровому масштабі. У такому випадку за допомогою ІБС знаходять зону інтересу на великих за розміром об'єктах (350×350мм), а самі вимірювання із нанометровою роздільною здатністю проводять нановимірювальною машиною [9,10,11].

Інтерферометрія білого світла може застосовуватися як для високоточного вимірювання механічного переміщення, так і різних фізичних величин, які його викликають (наприклад, деформації, температури, вібрації) [12,13]. Одним із

перспективних застосувань ІБС є сенсори тиску, принцип дії яких полягає у реєстрації інтерферограм мембрани та реконструкції її топології, що пов'язана із рівнем тиску.

На тлі досягнень комп'ютерних технологій відкриваються нові можливості автоматизації процесу реєстрації та опрацювання інтерферограм. Це спрощує застосування цієї вимірювальної технології, а завдяки підвищенню ефективності та можливості комп'ютерного опрацювання інтерферограм в реальному часі розширює коло задач, що вирішується за її допомогою [14,15,16]. На сьогоднішній день оптико-механічні та електронні вузли інтерферометрів забезпечують отримання інтерферограм із досить високою точністю і відтворюваністю. Але у процесі дослідження топології поверхні важливу роль відіграють не лише точність реєстрації інтерферометричної картини, а також методи і алгоритми, за допомогою яких здійснюють її опрацювання. При цьому вкрай важливо не лише забезпечити стійкість методів до впливу шумів, оптичних нелінійностей та інших небажаних чинників, але також запропонувати варіанти їх ефективної реалізації на сучасних обчислювальних платформах, таких як програмовані логічні матриці (FPGA), графічні процесори (GPU), цифрові сигнальні процесори (DSP). Про актуальність таких завдань свідчать численні публікації [17,18,19,20,21].

Порівняно із традиційною монохроматичною інтерферометрією, опрацювання інтерферограм білого світла з метою реконструкції топології поверхні є значно складнішим. Це передовсім зумовлено згасанням сигналу інтенсивності або, іншими словами, наявністю огинаючої амплітуди інтерферограми. На цей час розроблено низку методів реконструкції топології поверхні, наприклад, у просторовій області методи визначення огинаючої амплітуди або максимальних значень інтенсивності, а в області просторової частоти - метод фазового зсуву чи перетворення Фур'є [22,23,24,25]. Проте відомі методи не дають задовільних результатів для завдань, коли робоча поверхня є нелінійною (зокрема сферичною), а її параметри змінюються в часі [20,25,26].

Таким чином, актуальним є завдання розроблення нових ефективних у обчислювальному та метрологічному сенсах методів реконструкції топології

нелінійних поверхонь зі змінними параметрами із інтерферометричної картини, одержаної за технологією інтерферометрії білого світла. Крім того, важливо дослідити та розробити варіанти імплементації цих методів на різних обчислювальних платформах з метою забезпечення високої швидкодії, а також можливості вбудовування обчислювальних засобів до оптичної апаратури.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в рамках пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки в Україні, а також в рамках держбюджетної науково-дослідницької роботи, що виконувалася за тематичними планами Міністерства освіти і науки України: «Дослідження засобів вимірювання геометричних розмірів оптичними методами в нанометровому діапазоні» ДБ/Діапазон (№ держреєстрації 0113U003188, 2013-2014 рр, Наказ Міністерства освіти і науки України від 22.10.2012 р. № 1193) та договору про співпрацю з Технічним Університетом Ільменау.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення нових та вдосконалення відомих методів реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами із інтерферограми білого світла та дослідження способів їх ефективної з погляду швидкодії і точності імплементації в комп'ютерну інтерферометричну систему.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розглянути сфери використання інтерферометрії білого світла. Проаналізувати відомі методи опрацювання інтерферограм білого світла та їх придатність до реконструкції топології нелінійних поверхонь зі змінними параметрами.
2. Розробити концепцію побудови високоефективних комп'ютерних систем реєстрації та опрацювання сигналів інтенсивності інтерферограми білого світла та запропонувати і обґрунтувати моделі і методи, які забезпечать реконструкцію топології нелінійних поверхонь зі змінними параметрами з необхідною, для потреб практики, обчислювальною ефективністю і точністю.
3. Обґрунтувати методику оцінювання обчислювальної і точності ефективності розроблених і вдосконалених моделей та методів реконструкції топології



нелінійних поверхонь зі змінними параметрами із інтерферограми білого світла.

4. Розробити та дослідити адекватність методів реконструкції профілю поверхні шляхом опрацювання сигналів інтенсивності інтерферограми білого світла у просторовій області.
5. Дослідити механізм впливу кривизни поверхні на сигнал інтенсивності і його спектр і на основі цього вдосконалити методи реконструкції профілю поверхні у області просторової частоти, що базуються на дискретних перетвореннях Фур'є та Гільберта.
6. Забезпечити можливість застосування розроблених методів для реконструкції топології поверхні, забезпечити ефективне знешумлення та опрацювання реальних інтерферограм білого світла.
7. Дослідити та розробити варіанти ефективної імплементації розроблених методів і алгоритмів реконструкції топології поверхні на різних обчислювальних платформах, зокрема із урахуванням можливості розпаралелення обчислень та умов експлуатації комп'ютерної інтерферометричної системи.

**Об'єкт дослідження** – процес реконструкції топології поверхонь на основі інтерферограми білого світла.

**Предмет дослідження** – методи і засоби комп'ютерного опрацювання сигналів інтенсивності інтерферограм білого світла, які є придатними для реконструкції топології нелінійних поверхонь зі змінними параметрами з погляду обчислювальної ефективності та точності.

**Методи дослідження** – методи і апаратно-програмні засоби комп'ютерних систем, основи хвильової оптики та інтерферометрії, теорія похибок і непевності результатів вимірювань, теорія імовірності та математичної статистики, методи цифрового опрацювання сигналів, методи імітаційного моделювання, чисельні методи.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Розширено теоретичні засади побудови комп'ютерних систем інтерферометрії білого світла в аспектах розподілу обчислювальної потужності для ефективного опрацювання інтерферометричних зображень і сигналів, уточнення моделей, що покладені в основу нових й удосконалених методів реконструкції топології нелінійних поверхонь зі змінними параметрами, а також розроблення методології і критеріїв оцінювання обчислювальної ефективності та точності методів реконструкції.
2. Вперше розроблено метод посегментної апроксимації, суть якого полягає у оберненні функції перетворення інтерферометричного каналу та застосуванні обчислювально простих методів поліноміальної апроксимації окремих сегментів інтерферограм, що дає змогу реконструювати нелінійні поверхні із мінімальними обчислювальними затратами та похибками.
3. Вперше виконано декомпозицію сигналу інтерферометрії білого світла на комплексні експоненти, що дало змогу застосувати придатний до розпаралелення по точках метод Проні для визначення оптичної різниці ходу та реконструювати профіль нелінійної поверхні.
4. Удосконалено методи нормалізації інтерферограми білого світла у просторовій і частотній областях, застосування яких забезпечує інваріантність до впливу огинаючої амплітуди сигналу та підвищує обчислювальну ефективність і точність реконструкції топології поверхні.
5. Удосконалено метод реконструкції топології поверхні на основі дискретного перетворення Гільберта, який, на відміну від відомих, передбачає логарифмування аналітичного сигналу та виділення інформативного параметра із уявної складової, що дає змогу уникнути проблем, пов'язаних із неоднозначністю функції арктангенс.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Отримано методику синтезу поверхонь із заданими параметрами та симуляції інтерферограм білого світла, що дає змогу оцінювати обчислювальну ефективність і точність методів реконструкції топології поверхні.
2. Розроблено пакет програм у середовищі MatLab для реалізації розроблених методів реконструкції топології поверхні та дослідження їх обчислювальної ефективності і точності.
3. Розв'язано задачу розгортання фази несучої за застосування обернених тригонометричних функцій косинуса і тангенса для одно- та двовимірного випадків; одержані результати можуть бути використані у інженерній практиці при вирішенні подібних завдань.
4. Розроблено високоефективний алгоритм прорідження інтерферометричних кадрів, що має важливе значення для зниження обчислювальних затрат та дає змогу досліджувати швидкоплинні процеси. Для знешумлення інтерферограм білого світла застосовано цифрові фільтри та вейвлет-перетворення.
5. Запропоновано варіанти реалізації розроблених методів реконструкції поверхні на таких обчислювальних платформах як FPGA, GPU, DSP із урахуванням можливості розпаралелення обчислень і умов експлуатації комп'ютерної інтерферометричної системи.
6. Проведено експериментальні вимірювання на інтерферометричному обладнанні Технічного Університету Ільменау об'єктів із лінійною та сферичною поверхнями та реконструйовано за допомогою розроблених методів їх топологію, що підтверджує адекватність застосованих моделей.

Отримані в дисертації результати наукових досліджень використовуються в науково-дослідній роботі “Дослідження засобів вимірювання геометричних розмірів оптичними методами в нанометровому діапазоні” та навчальному процесі кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка», зокрема при вивченні дисциплін «Комп'ютерне опрацювання вимірювальної інформації» і «Спеціальні методи вимірювань». Також

результати дисертаційної роботи впроваджено у виробництво на підприємстві ПАТ НВО "Термоприлад", що засвідчено відповідними актами впровадження результатів роботи (див Додаток А).

### **Особистий внесок здобувача.**

Основні наукові результати, викладені в роботі, отримані автором особисто. Із публікацій, написаних у співавторстві, здобувачу належить:

[25] – порівняльний аналіз відомих методів реконструкції поверхні із ІБС за розробленими критеріями, оцінювання їх придатності до реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами;

[62] - розроблення способів оцінювання огинаючої амплітуди сигналу інтерферограми, методики оцінювання точності;

[71] – декомпозиція сигналу інтерферограми на комплексні експоненти, визначення інформативного параметра із моделі Проні, аналіз ефективності методу для реконструкції нелінійних поверхонь;

[63] - розроблення методу посегментної апроксимації та способу визначення коефіцієнтів апроксимуючого поліному, оцінювання обчислювальної ефективності і точності;

[78] - дослідження умов та обмежень застосування теорії аналітичного сигналу до інтерферограми білого світла;

[69] – розроблення методики оцінювання точності і ефективності реконструкції профілю поверхні за методом Проні;

[79] – розроблення методики та критеріїв оцінювання точності методів реконструкції поверхні.

### **Апробація результатів роботи.**

Основні положення і результати роботи апробовано у 5 доповідях на таких конференціях:

- Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2015», Славське, 2-6 лютого 2015 року;

- II Міжнародна науково-практична конференція «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», Львів, 28-30 травня 2015 року;
- Міжнародна дистанційна конференція «Advances in the natural sciences and engineering – 2015», Будапешт (Угорщина), 28 червня 2015 року;
- Міжнародна науково-технічна конференція «XX Międzynarodowy Seminarium Metrologów MSM'2015», Жешов та Івоніч Здруй (Польща), 21-24 вересня 2015 року;
- III Міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах-2015», Вінниця, 27-29 жовтня 2015 року.

### **Публікації.**

За темою дисертації опубліковано 11 наукових робіт, у тому числі 3 статі у фахових виданнях України та 5 статей у закордонних науково-метричних журналах.

### **Структура та обсяг дисертації.**

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, і переліку цитованої літератури із 97 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 161 сторінок друкованого тексту, у тому числі 133 сторінки основного тексту, включаючи 72 ілюстрацій і 8 таблиць. Три додатки містять акти впровадження та коди імплементації вибраних методів реконструкції.

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОМП'ЮТЕРНИХ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТОПОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ

#### 1.1. Технології контролю топології поверхні

Відомо багато задач у галузі науки і техніки, де потрібно досліджувати топологію поверхні. Так розміри та характеристики поверхні є важливими параметрами при виготовленні елементів для мікроелектромеханічних систем, напівпровідникових компонентів, для контролю якості прозорих плівок моніторів, рідкокристалельних дисплеїв, тощо [27,28]. Відомо чимало контактних і безконтактних методів, які забезпечують подібні вимірювання. Насамперед це контактна профілометрія (contact stylus scanning), атомно-силова мікроскопія, скануюча тунельна мікроскопія, вертикальна скануюча інтерферометрія, конфокальна мікроскопія, інтерферометрія фазового зсуву і багато інших [2,22,28].

Проте беззаперечна перевага належить оптичним засобам, зокрема інтерферометрам [27]. Відсутність фізичного контакту із досліджуваною поверхнею, висока роздільна здатність та швидкість сканування, а також можливість дослідження об'єктів із значними геометричними розмірами – це неповний перелік переваг інтерферометрів у завданнях дослідження топології поверхонь.

За більш як сторічний термін свого існування, інтерферометри пройшли значний шлях розвитку й удосконалення [1,28,29]. На сьогодні відомо багато різновидностей цих оптичних пристроїв, що орієнтовані на ефективне вирішення специфічних наукових і технологічних проблем. Зокрема, за останні роки значна увага приділяється побудові та застосуванню низькокогерентних інтерферометрів або інтерферометрів білого світла, які мають низку переваг при дослідженнях топології складних поверхонь [1,14,27].

На практиці інтерферометри білого світла працюють у складі комп'ютерних систем, на які покладено завдання одержання якісної інтерферометричної картини досліджуваної поверхні та реконструкція на її основі топології. Через малу

тривалість когерентності білого світла (на відміну від монохроматичного) складніше досягти інтерференції хвиль та зареєструвати стійку і якісну інтерферометричну картину [14]. Крім того, швидке згасання інтенсивності інтерферограми істотно ускладнює методи і алгоритми реконструкції топології поверхні відомими методами. Тому важливо не лише розробити методи реконструкції, але також дослідити їх обчислювальну складність та запропонувати варіанти ефективної імплементації та сучасні обчислювальні платформи.

## 1.2. Особливості дослідження топології поверхні за допомогою інтерферометрії білого світла

У інтерферометрії застосовують джерела світла видимого діапазону, тобто із довжиною хвиль від 380 до 780 нанометрів [29]. Світло з однією строго визначеною і постійною частотою називається монохроматичним та на практиці одержується за допомогою одного лазерного джерела світла. Дві монохроматичні хвилі з сталою різницею фаз називаються когерентними [30].

Біле світло це не детермінований процес, який в кожен момент часу характеризується випадковою амплітудою і частотою. Спектральна густина білого світла може мати різну форму, але переважно описується нормальним законом розподілу, як показано на рис.1.1 [31].

Спектральна густина білого світла із нормальним законом розподілу описується наступною формулою [31]:

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \cdot \Delta\omega} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega}\right)^2\right], \quad (1.1)$$

де  $\omega_0$  – центральна частота білого світла;

$\Delta\omega$  – ширина спектру;

$\omega$  – поточна частота.

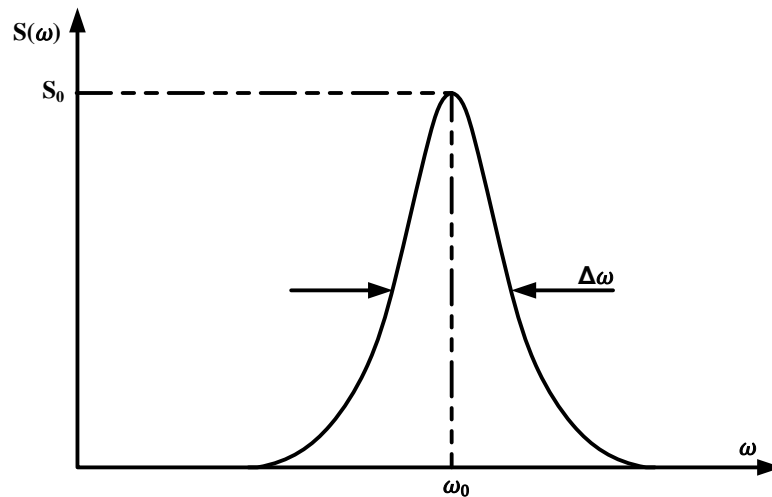


Рис. 1.1. Спектральна густина білого світла з нормальним законом розподілу [31]

З поданої вище формули випливає, що найважливішими параметрами білого світла є ширина спектру  $\Delta\omega$  і центральна частота  $\omega_0$  (або відповідно відхилення довжин хвиль  $\Delta\lambda$  та центральна довжина хвилі  $\lambda_0$ ).

Випромінювання світла відбувається внаслідок переходу атомів зі збудженого стану в нормальний. Процес випромінювання скінченний і триває дуже короткий час. Через деякий час атом знову може збудитися і почати випромінювати світлові хвилі, але уже з іншою початковою фазою. Переривчасте випромінювання світла атомами у вигляді окремих короткочасних імпульсів називається хвильовим цугом. Інтервал часу між двома хвильовими цугами називається часом когерентності.

Інтерференція це явище накладання двох або більше когерентних хвиль. В результаті спостерігається підсилення та ослаблення результуючої хвилі. Вимірювальний пристрій, принцип роботи якого базується на явищі інтерференції, називається інтерферометром. Будова цього пристрою представлена на рис. 1.2.

Для пояснення принципу роботи інтерферометрів використано інтерферометр Майкелсона. Хвиля від джерела світла поділяється світлоподільником на дві хвилі  $W_1$  і  $W_2$ , що спрямовуються до опорного дзеркала та досліджуваного об'єкту відповідно. Хвилі відбиваються від об'єктів та повертаються до світлоподільника, де вони накладаються. Результат накладання хвилі реєструється CCD-камерою. Для покращення якості інтерферометричного



зображення застосовується низка додаткових елементів, як от поляризатори, лінзи, коліматори, світловоди, тощо [29].

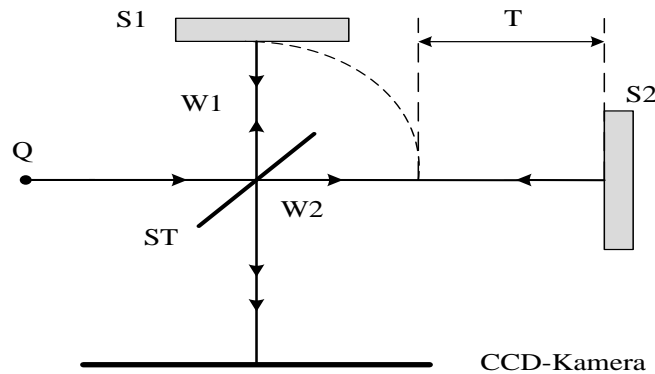


Рис. 1.2. Оптична схема інтерферометра Майкелсона [32]

Математична модель інтерферограми білого світла описується такими виразами [33,34]:

$$I(T) = I_0 + I_M \cdot E(T) \cdot C(T) \quad (1.2)$$

де  $I(T)$  – інтенсивність сигналу інтерферограми у кожній точці;

$T$  – оптична різниця ходу опорного і вимірювального променів;

$I_0$  – стала складова сигналу інтенсивності інтерферограми;

$I_M$  – модуляційна амплітуда;

$E(T)$  – огибаюча амплітуди сигналу інтенсивності інтерферограми;

$C(T)$  – несуча частоти сигналу інтенсивності інтерферограми;

$$E(T) = \exp\left(-\frac{4 \cdot T^2}{l_c^2 / 2}\right) \quad (1.3)$$

$$C(T) = \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot T + \varphi_0\right) \quad (1.4)$$

$l_c$  – довжина когерентності світлових хвиль;

$\lambda_0$  – центральна довжина хвилі;

$\varphi_0$  – початкова фаза, яку зазвичай не враховують у задачах реконструкції.

Довжина когерентності визначається як відстань, яку проходить хвиля за час когерентності. Довжина когерентності світла  $l_c$  із нормальним розподілом

спектральної густини залежить від ширини спектру та центральної довжини хвилі  $\lambda_0$  таким чином [35,36]:

$$l_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (1.5)$$

$\Delta\lambda$  – ширина спектру (в шкалі довжин хвиль) [32].

На рис. 1.3 представлено інтерферограми білого світла для сферичної поверхні, отримані для джерел світла з різними параметрами.

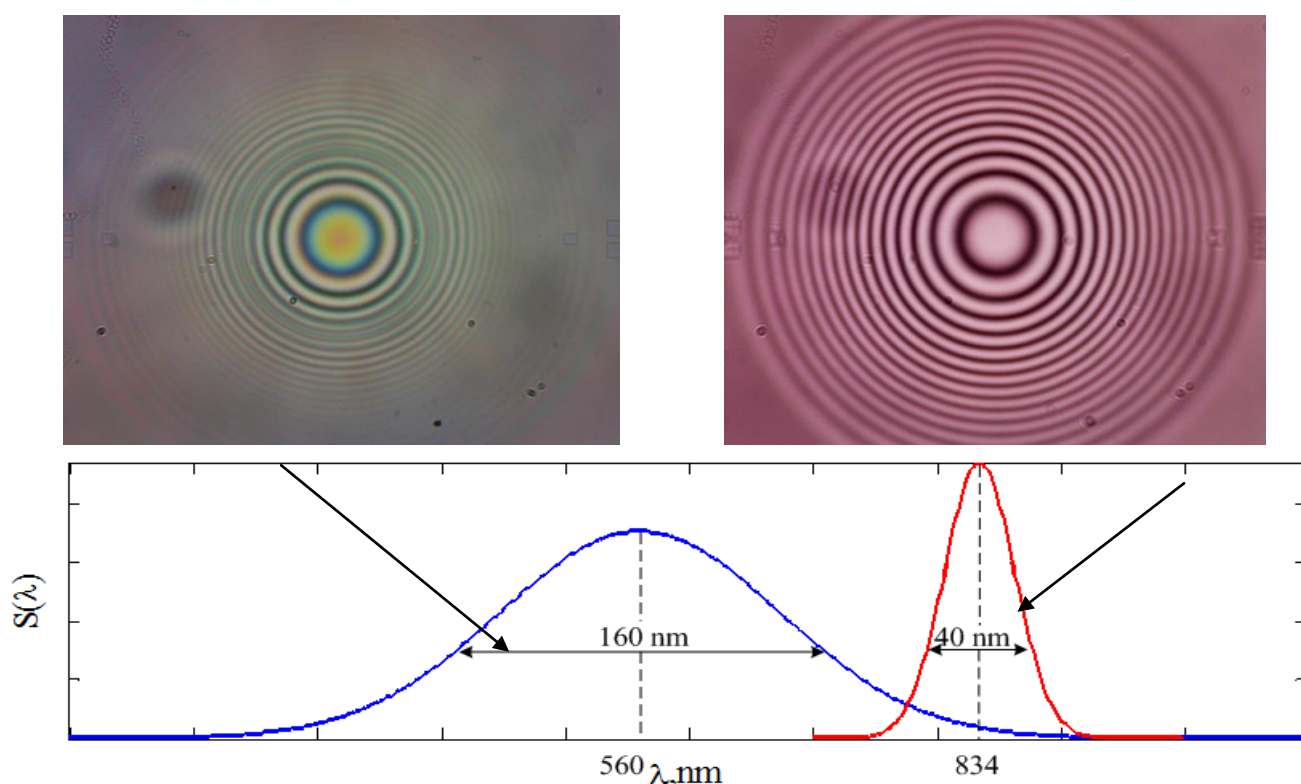


Рис. 1.3. Реальні інтерферограми сферичної поверхні для різних джерел світла

Слід зауважити, що вигляд інтерферограми залежить від спектральної ширини і центральної довжини хвилі. Інтерферограма зліва містить кольорові кільця різної товщини, які швидше згасають у міру віддалення від центру оскільки одержана за використання джерела світла із ширшою спектральною густиною розташованою в центрі видимого діапазону. Інтерферограма справа одержана за використання джерела світла із вузкою спектральною густиною розташованою на краю видимого діапазону, тому ширина інтерференційних кілець змінюється

незначно, краще зберігається їх контрастність у міру віддалення від центру, а сама інтерференційна картина більш монохроматична.

Тоді модель сигналу інтенсивності інтерферограми можна представити у вигляді:

$$I(T) = I_0 + I_M \cdot \exp\left(-\frac{8 \cdot T^2 \cdot \Delta\lambda^2}{\lambda_0^4}\right) \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot T\right) \quad (1.6)$$

Вигляд сигналу інтерферограми білого світла для лінійної поверхні зображено на рис. 1.4.

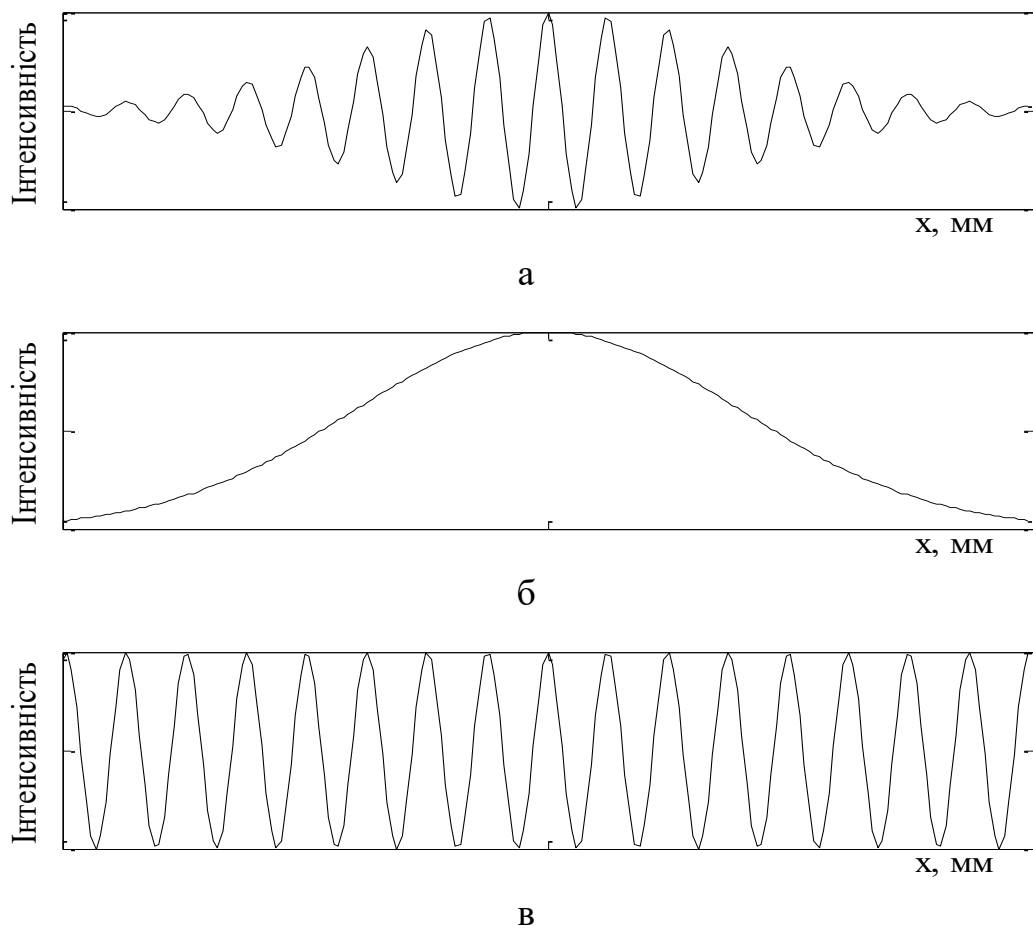


Рис. 1.4. Сигнал інтерферограми білого світла лінійної поверхні  
а – інтенсивність інтерферограми; б – огибаюча амплітуди; в – несуча частоти

Суть реконструкції полягає у визначенні із сигналу інтерферограми оптичної різниці ходу  $T$ , що пропорційна висоті  $h$  (профілю) досліджуваної поверхні у кожній її точці  $(x, y)$ :

$$h = \frac{T}{\nu}, \quad (1.7)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт заломлення середовища.

### 1.3. Сфери використання інтерферометрів білого світла

Оптична інтерферометрія – це техніка безконтактного вимірювання топології поверхні, в основі якої лежить інтерференція світлових променів. Оптична інтерферометрія дає змогу досліджувати поверхні розміром від кількох сантиметрів до кількох мікрометрів, при цьому латеральна роздільна здатність (по осях  $x$  та  $y$ ) сягає порядку кількох мікрометрів, а роздільна здатність визначення висоти (по осі  $z$ ) - до кількох нанометрів. Роздільна здатність інтерферометра визначається довжиною хвилі світла [1].

Звичайна монохроматична інтерферометрія є поширеною технікою дослідження поверхонь, оскільки монохроматичне світло створює інтерферометричні смуги високої якості, які легко зберігати та опрацьовувати. Попри велику кількість переваг монохроматична інтерферометрія має і недоліки, зокрема неоднозначність відтворення топології поверхні із перепадами більшими за довжину хвилі [32]. Цього недоліку позбавлена інтерферометрія білого світла (ІБС), тому вона дає змогу здійснювати вимірювання шорстких, сходинчастих поверхонь, а також поверхонь із різким ухилом [29,37,38,39].

Іншою перевагою інтерферометрії білого світла, порівняно із монохроматичною, є нижчий рівень шумів через відсутність фальшивих інтерферометричних смуг [14,37,40]. Практично в кожному оптичному пристрої або системі, що містить оптичні компоненти, наявні паразитні відбиття (spurious reflections). За використання довгокогерентних джерел світла (наприклад, лазери) ці відбиття створюють фальшиві інтерферометричні смуги, додаючи шум до вимірювання. В системах, що використовують низькокогерентне світло (таке як фільтроване біле світло) паразитні відбиття також існують, проте вони проявляються, якщо різниця ходу променів не перевищує кількох мікрометрів.

При дослідженні структури мікроповерхонь (micro-surface structure) оптичними профілометрами вкрай важливо, щоб поверхня знаходилася у фокусі. Для гладких поверхонь інколи виникають труднощі визначення фокусу [37]. За використання низькокогерентного світла інтерференційні смуги виникають лише тоді, коли шляхи пройдені променями практично збігаються. Максимальний контраст інтерферограми спостерігається у разі точного збігу довжини шляхів променів, відбитих від опорного дзеркала та досліджуваної поверхні. Таким чином, рухаючи досліджувану поверхню і знайшовши максимальну контрастність інтерферограми, можна визначити фокус.

Враховуючи ці переваги, ІБС нашла широке застосування в науці та техніці не лише для точного вимірювання відстані, топології та шорсткості поверхонь, але також для контролю переміщення, вібрації, однорідності чи товщини матеріалу, для вимірювання тиску і температури, дослідження оптичних систем, тощо [1,29,41].

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС), що поєднують в собі мікроелектронні і мікромеханічні компоненти, широко використовуються в техніці при розробці різноманітних сенсорів. Для технології МЕМС важливою є мінітюаризація мікрокомпонентів. Типові розміри мікромеханічних елементів знаходяться в діапазоні від одного до ста мікрометрів, тоді як розміри кристала мікросхеми МЕМС мають розміри від 20 мікрометрів до одного міліметра. Для того, щоб визначати статичні та динамічні характеристики мікроелектромеханічної системи в цілому вкрай важливо знати такі їхні параметри, як розміри, якість поверхні тощо [38,42]. Ці завдання вирішуються за допомогою ІБС.

ІБС також застосовується для вимірювання тиску, зокрема кров'яного [43,44]. В медичних обстеженнях та лікуванні тиск є важливим параметром для моніторингу стану здоров'я людини. Вимірювання динамічних змін кров'яного тиску сонної артерії в щурів були успішно проведені з використанням мініатюрного волокно-оптичного сенсора діаметром 125 мкм [43]. Сенсор містить два дзеркала, одне з яких виконує роль мембрани. Деформація мембрани під дією тиску змінює довжину резонатора. Поєднання із ІБС дало змогу визначати зміну

довжини уникаючи шумів, зумовлених кривизною оптичного волокна та флуктацію джерела світла. Достатньо малі розміри сенсора уможливають його імплементацію в інтервенційні медичні інструменти (напр. катетер, провідник). Сенсор забезпечує вимірювання тиску в діапазоні 50-400 мм рт.ст. із роздільною здатністю 3,8 мм рт.ст.

За використання ІБС для аналізу поверхонь покритих тонкими плівками, в інтерферограмі з'являються два піки, спричинені відбиттям від передньої та задньої поверхонь (front and back surfaces) [45]. Ці піки дають змогу визначити товщину та профіль плівки. На базі ІБС створено профілометр, що дає змогу проводити вимірювання в діапазоні від 0 до 100 мкм. Цей профілометр використовується в процесі виробництва напівпровідників та рідкокристалевих дисплеїв LCD.

ІБС використовується для контролю якості клинів під час ультразвукової зварки [46]. Ультразвукове зварювання є важливим при виготовленні виробів мікроелектроніки. Воно використовується для виконання механічних та електричних з'єднань. При цьому важливо, щоб робоча поверхня клина під ультразвуком чітко відповідала заданим характеристикам, для забезпечення міцного з'єднання дротів. Завдяки високій швидкості вимірювання та високій вертикальній роздільній здатності (в кілька нанометрів) ці завдання ефективно виконують інтерферометри білого світла.

За допомогою ІБС також здійснюють вимірювання абсолютної температури [41]. Для цього одночасно використовують 3 інтерферометри білого світла (2 Фабрі-Перо та Маха-Цендера). Один інтерферометр Фабрі-Перо виконує роль зондувального і нагрівається до температури довкілля. Інший інтерферометр Фабрі-Перо, що є опорним і захищеним від змін в навколишньому середовищі, нагрівається до відомої температури  $T_p$ . Інтерферометр Маха-Цендера є опрацьовуючим інтерферометром (processing interferometer) і налаштовується таким чином, щоб спостерігалася інтерферограма від зондувального інтерферометра. До двох плечей інтерферометра опрацювання підключені п'єзоелектричні перетворювачі, напруга яких напряму залежить від різниці ходу

між двома плечима інтерферометра. Знаючи різниці ходу та опорну температуру можна визначити абсолютну температуру зондувального інтерферометра.

На базі інтерферометра білого світла також побудована система сенсорів для одночасного визначення тиску і температури [13]. Така система може містити до чотирьох сенсорів тиску і температури та дає змогу вимірювати тиск в діапазоні від 0 до 20 МПа, а температуру в діапазоні  $\pm 50^\circ\text{C}$ .

Крім того, інтерферометр білого світла лежить в основі системи для вимірювання шорсткості поверхні із високою роздільною здатністю [47]. В одному плечі інтерферометра розміщено досліджувану шорстку поверхню, а в іншому – опорне дзеркало. Роль опорного дзеркала виконує зондувальне волокно. Використовуючи таку систему можна проводити вимірювання шорстких поверхонь, глибина шорсткості яких змінюється в межах від 2 до 4,5 мкм із похибкою  $\pm 450$  нм.

Незважаючи на широке коло задач та різноманітні сфери застосування в інтерферометрах білого світла по суті виконується реконструкція профілю робочої поверхні відповідних сенсорів на основі зареєстрованої інтерферометричної картини. Далі використовуючи відомі залежності значення  $z(x, y)$  поверхні сенсора визначається контрольований параметр чи фізична величина (тиск, температура, тощо). Тому розглянемо принцип утворення інтерферометричної картини та її зв'язок із топологією поверхні.

#### **1.4. Огляд відомих методів опрацювання сигналів інтерферометрії білого світла в комп'ютерних системах контролю топології поверхні**

Відомі методи реконструкції топології поверхні в інтерферометрії білого світла можна умовно поділити на два класи, що передбачають визначення інформативного параметра  $T$  відповідно із огинаючої амплітуди та несучої частоти сигналу інтенсивності.

Наприклад, до методів виділення огинаючої амплітуди із сигналу інтерферограми та обчислення на її основі оптичної різниці ходу відносять методи: сегментний, ковзного середнього, зваженого ковзного середнього, з використанням

перетворення Фур'є або Гільберта [38,48]. Наприклад, метод ковзного середнього за своїм змістом передбачає низькочастотну фільтрацію з метою придушення несучої частоти. Теоретично найточніші результати для визначення огинаючої амплітуди можна одержати з використанням перетворення Гільберта.

Метод визначення максимальної інтенсивності інтерферограми також належить до методів першого класу і націлений на пошук точки із максимальною інтенсивністю, що відповідає значенням відносної висоти поверхні [38]. Цей метод потребує менше місця у пам'яті для зберігання даних, тому придатний для високошвидкісних вимірювань у реальному часі. У методі для кожної точки необхідно виконати 4 операції запам'ятовування, щоб зберегти інтенсивність  $i$ -тої точки сканування впродовж вимірювань. Визначене максимальне значення відповідає відносній висоті відповідної точки досліджуваної поверхні. Очевидно, що роздільна здатність цього методу обмежена кроком інкремента. Для підвищення точності необхідно зменшити інкремент. Однак при цьому збільшується час вимірювання і значно зростає вплив шумів на результати.

За фазової демодуляції несучої частоти (1.4) можна досягти вищої чутливості, аніж за амплітудної демодуляції огинаючої (1.3). Крім того, фаза чи частота, як інформативний параметр, є стійкішою до впливу завад (порівняно із амплітудою). Тому топологію поверхні доцільно визначати із фази сигналу. Отже, описані нижче методи належать до другого класу.

Метод прямої фазової демодуляції передбачає визначення фази сигналу інтерферограми із відношення дійсної та уявної складових. Для отримання квадратурної складової застосовується адаптивний метод частотної демодуляції [20] або перетворення Гільберта [49]. Однак за використання такого методу виникає проблема реконструкції нелінійної поверхні, оскільки несуча частота в такому випадку має квазісинусоїдальний характер.

Метод фазового зсуву базується на аналізі кількох зсунутих за фазою інтерферограм [22,26,38]. Для однозначного визначення фази у кожній точці інтерферограми необхідно виконати щонайменше 3 вимірювання із відомим фазовим зсувом. Початково методи фазового зсуву було розроблено для



інтерферометрії монохроматичного, а не білого світла. Тобто передбачалося, що інтенсивність інтерферограми є незмінною. Тому за використання класичних алгоритмів фазового зсуву для ІБС виникають істотні похибки реконструкції. Для зменшення їх впливу слід враховувати зміну інтенсивності інтерферограми білого світла. Один з методів базується на припущенні, що огинаюча амплітуди інтерферограми є лінійною на обмежених інтервалах, тобто може апроксимуватися кусково-лінійною кривою [50]. Реалізація методу потребує реєстрації 7-ми інтерферограм із фазовим зсувом  $k\pi/2$  ( $k = -3 \dots +3$ ). Однак практичне застосування цього методу нашоується на деякі проблеми. Припущення про локальну лінійність огинаючої амплітуди вносить похибки в кінцевий результат. Іншою проблемою є потреба точної зміни вертикальної позиції опорного дзеркала із кроком  $k\pi/2$ , що складно реалізувати на практиці. Крім того, необхідність використання великої кількості інтерферограм унеможливує здійснення вимірювань у реальному часі.

Метод відстеження смуг заснований на припущенні, що місцеві екстремуми інтенсивності в інтерферограмі відповідають екстремумам передбачуваної гармонічної функції отриманого інтерференційного сигналу[26]. В цьому випадку різниця фаз в кожній точці інтерференційної картини, де розташований інтерференційний максимум або мінімум, кратна значенню  $\pi$ . Основна проблема даного методу полягає в визначенні точок, що лежать в центрі смуг інтерферограми, де різниця фаз відома. Потім від цих точок може бути розраховано значення фази.

Метод перетворення Фур'є базується на перенесенні та аналізі сигналу інтенсивності в частотній області [26]. Амплітудний спектр є симетричним відносно сталої складової. Спектральний пік на нульовій частоті представляє компоненти із нижніми спектральними компонентами, що виникають внаслідок модуляції фону інтенсивності інтерферограми. Дві симетричні бічні спектральні пелюстки несуть однакову інформацію про значення фази  $\Delta\varphi$ . Застосовуючи відповідні адаптивні смугові фільтри в області просторової частоти можна виділити одну з бічних пелюсток. Значення розгорнутої фази може бути потім

розраховане шляхом зворотного перетворення Фур'є відфільтрованого спектра. Розриви значень фази повинні бути правильно розгорнуті за допомогою відповідних математичних методів.

Недоліком цього методу, як і методу відстеження смуг, є неоднозначність знаку розрахованих значень фази. Смугове фільтрування спектру Фур'є є основним кроком описаного методу. Використання відповідного фільтра дозволяє практично усунути шуми та неінформативні компоненти в інтерферограмі. Однак, невдало підібрані параметри фільтра можуть спричинити грубі порушення корисних даних.

Вейвлет-перетворення віднедавна широко застосовують для фазової демодуляції смугових картин. Це є відома теорія опрацювання цифрових сигналів, що є придатнішою для аналізу нестационарних сигналів, зокрема сигналів, частота яких змінюється у часі [20]. Проведено дослідження із використанням неперервного вейвлет-перетворення [38]. Ці алгоритми визначають фазу картини і можуть бути поділені на два підходи – з оцінкою фази або частоти.

Результати порівняльного аналізу методів реконструкції наведено у таблиці [25].

Таблиця 1.1

**Порівняльний аналіз методів реконструкції топології поверхні на основі інтерферограми білого світла**

Метод	Параметри	Кількість необхідних картин	Область аналізу	Обчислювальна складність	Стійкість до шумів	Можливість динамічних вимірювань	Інваріантність до розривів	Складність автоматизації
Визначення огибаючої амплітуди		одна	п	с	н	так	ні	н
Визначення максимальної інтенсивності		кілька	п	н	н	ні	ні	в
Пряма фазова демодуляція		одна	п	с	с	так	так	н
Фазовий зсув		кілька	п	н	с	ні	так	в
Перетворення Фур'є		одна	ч	в	в	так	ні	н
Відстеження частотних смуг		одна	ч	в	с	ні	ні	н
Вейвлет-перетворення		одна	п/ч	д	в	так	ні	с
п – просторова, ч – частотна с – середня, н – низька, в – висока, д – дуже висока								

Реконструкція поверхонь зі змінними в часі параметрами передбачає підвищені вимоги щодо швидкодії, тому розглядаються методи, які дають змогу здійснювати реконструкцію лише на основі однієї інтерферограми. Іншою проблемою для багатьох застосувань ІБС є нелінійний характер реконструйованих поверхонь. Описані методи реконструкції є недостатньо точними, оскільки з'являються обчислювальні похибки, зумовлені наявністю складної залежності оптичної різниці ходу  $T$  у нелінійних рівняннях (1.3)-(1.4). Видається, що

потенційно найбільш придатними для реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами можуть бути методи вейвлет-перетворення та відстеження частотних смуг. Оскільки ці методи є обчислювально складними навіть для лінійних поверхонь, тому пошук шляхів, які б уможливили підвищення точності реконструкції нелінійних поверхонь вимагатиме додаткових обчислювальних затрат. В зв'язку з цим актуальним є дослідження способів їх імплементації на різних обчислювальних платформах з метою забезпечення високої швидкодії, а також можливості вбудовування обчислювальних засобів до оптичної апаратури.

### **1.5. Формування напрямків подальших теоретичних і експериментальних досліджень**

Інтерферометрія білого світла здобула в останні десятиліття велику зацікавленість дослідників, про що свідчать численні публікації. Завдяки низці переваг сфери її застосування постійно розширюються. Цьому сприяє робота інтерферометрів у складі комп'ютерних систем.

Багато задач вимагають реконструювання топології поверхні різноманітних сенсорів на основі зареєстрованих інтерферограм білого світла. При цьому додатково можуть висуватися вимоги щодо обмеження масогабаритних показників комп'ютерних систем, до складу яких входить інтерферометр та спеціалізований обчислювач. Враховуючи стрімкий розвиток комп'ютерних технологій доцільно передовсім покращувати характеристики таких систем за рахунок вдосконалення обчислювальної частини. Тому на цей час основна увага приділяється удосконаленню відомих та пошуку нових методів реконструкції поверхонь, дослідженню варіантів їх ефективної реалізації на сучасних обчислювальних платформах таких як графічні процесори, програмовані логічні матриці, цифрові сигнальні процесори. В порівнянні із монохроматичною інтерферометрією, задача реконструкції поверхонь з інтерферограм білого світла ускладнюється згасанням інтенсивності у міру віддалення від центру інтерферограми. Це породжує похибки реконструкції. Відомі методи ефективно розв'язують цю задачу для гладких поверхонь або поверхонь із незначною кривизною. Проте низка застосувань ІБС

пов'язана із реконструкцією нелінійних поверхонь зі змінними параметрами. У таких задачах відомі методи не забезпечують необхідної обчислювальної ефективності та точності.

Таким чином актуальним є пошук нових і вдосконалення у обчислювальному і метрологічному сенсах відомих методів реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами, а також їх ефективна імплементація на різних обчислювальних платформах, у тому числі придатних для застосування у вбудованих системах, що дозволить розширити сфери застосувань комп'ютерних систем інтерферометрії білого світла.

### **Висновки до 1 розділу**

1. Проведено огляд відомих методів, що використовуються для визначення топології чи профілю поверхні. Інтерферометрія білого світла викликала глибоке зацікавлення в останні роки завдяки беззаперечним перевагам швидкості вимірювання та безконтактності. Крім того, на відміну від монохроматичної інтерферометрії, відкриваються можливості вимірювання поверхонь зі значними перепадами.

2. Розглянуто принцип роботи оптичного інтерферометра на прикладі інтерферометра Майкелсона. Проаналізовано особливості вимірювання, що пов'язані із використанням низько-когерентного джерела світла, зокрема вплив когерентності на швидкість згасання інтерферометричного сигналу та максимальну висоту досліджуваної поверхні. Наведено математичну модель сигналу інтенсивності інтерферограми білого світла та описано суть реконструкції топології поверхні із сигналу інтерферограми, що полягає у визначенні оптичної різниці ходу опорного та вимірювального променів і подальшому перерахунку в висоту поверхні.

3. Проведено огляд сфер використання інтерферометрії білого світла. Ця вимірювальна методика використовується не лише для безпосереднього визначення топології, профілю чи шорховатості поверхні об'єкту, але і для опосередкованого

вимірювання температури навколишнього середовища, тиску, вібрації, для оцінювання якості оптичних систем, тощо.

4. Обґрунтовано вибір критеріїв та проведено порівняльний аналіз існуючі методів опрацювання даних інтерферометрії білого світла. Встановлено, що відомі методи є недостатньо ефективними у обчислювальному і метрологічному сенсах у випадку реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами.

5. Сформульовано задачу дисертаційного дослідження, яка полягає у розробленні нових і удосконаленні відомих методів реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами у реальному часі, дослідженню варіантів їх ефективної реалізації на різних обчислювальних платформах, доступних на сучасному етапі розвитку комп'ютерних технологій, зокрема придатних для застосування у вбудованих системах.

## РОЗДІЛ 2

# КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ РЕЄСТРАЦІЇ ТА ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ БІЛОГО СВІТЛА

### 2.1. Комп'ютерна система реєстрації і опрацювання інтерферограм білого світла

На цей час у практичних застосуваннях інтерферометри працюють у складі комп'ютерних систем, що забезпечує автоматичний пошук інтерферометричних зображень високої якості, їх реєстрацію із прив'язкою до координат простору, а також реконструкцію топології поверхні чи виконання інших метрологічних завдань. Існують різні модифікації комп'ютерних систем ІБС, наприклад, із рухомим вимірювальним об'єктом, двопроменеві, тощо. Структуру комп'ютерної системи для контролю топології поверхні на основі інтерферометрії білого світла наведено на рис. 2.1.

Детальний опис складу та функціонування інтерферометра, як оптичного пристрою, подано у першому розділі роботи (пункт 1.2). Хоча на цей час оптико-механічна частина комп'ютерних систем ІБС загалом задовольняє потреби практики, обчислювальну потужність сучасних засобів можна використати для ефективного придушення різних дестабілізуючих впливів, що мають місце у процесі реєстрації інтерферограм. Проте актуальним ключовим завданням, яке покладається на обчислювальні засоби комп'ютерних систем ІБС є розроблення ефективних методів і алгоритмів реконструкції поверхонь різного характеру у реальному часі та їх імплементація на різних обчислювальних платформах, доступних на сучасному етапі розвитку комп'ютерних технологій [51,52,53].

Спеціалізований обчислювач комп'ютеризованої системи ІБС виконує такі три істотно різні за своєю суттю функції:

- позиціонування досліджуваного об'єкта для створення умов виникнення інтерференції низькокогерентних хвиль білого світла;

- опрацювання зареєстрованих фотодетектором кадрів з метою відбору і підвищення якості інтерферограм;
- високоефективну реконструкцію топології поверхні на основі опрацювання окремих відібраних інтерферографічних зображень.

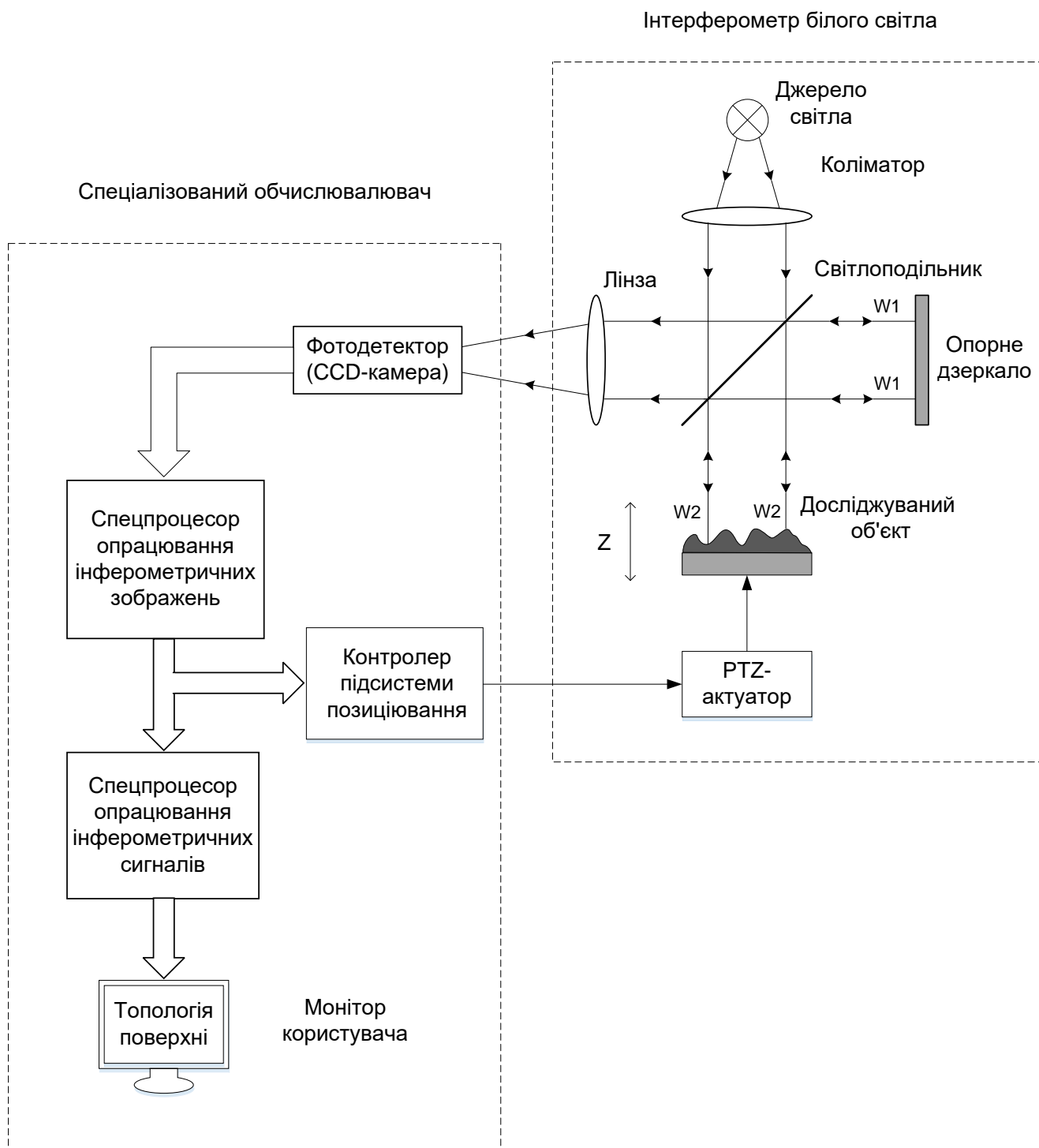


Рис. 2.1. Структура комп'ютерної системи ІБС



До складу спеціалізованого обчислювача входять CCD-камера у ролі фотодетектора для реєстрації інтерферограм, спецпроцесор оброблення інтерферометричних зображень, спецпроцесор оброблення інтерферометричних сигналів, монітор користувача для візуалізації топології реконструйованої поверхні, контролер підсистеми позиціювання, який керує актуатором (виконавчим пристроєм) у вигляді п'єзоелектричного перетворювача (PZT - piezoelectric transducer).

Контролер має основне завдання – на основі аналізу інтерферометричного зображення за допомогою п'єзоелектричного актуатора так змінювати вертикальне розташування досліджуваного об'єкту відносно світлоподільника, щоб викликати утворення стійкої і якісної інтерферометричної картини. До уваги можуть братися такі аспекти як розташування інтерферометричного максимуму, центрування інтерферограми, тощо. Крім того, контролер може виконувати переміщення об'єкту в латеральних осях зберігаючи незмінність відстані відносно світло подільника та забезпечуючи таким чином сканування для дослідження топології поверхні відносно великих об'єктів [9,11].

Враховуючи низький рівень когерентності хвиль джерела білого світла відносна оптична різниця ходу опорного і вимірювального променів знаходиться у вкрай обмеженому діапазоні, що висуває підвищені вимоги щодо роздільної здатності та стабільності рухомої частини інтерферометра керованого контролером. Проте на відміну від методів фазового зсуву відпадає потреба у пересуванні досліджуваного об'єкту під час вимірювальної процедури [7,14,26]. Тому застосування методів реконструкції топології поверхні із однієї інтерферометричної картини потенційно забезпечує подвійну вигоду - не лише підвищення швидкодії, але також і точності через усунення джерела похибок позиціювання рухомої частини інтерферметра.

У ролі фотодетектора виступає цифрова камера CCD (Charge-Coupled Device), параметри якої значною мірою впливають на метрологічні характеристики комп'ютеризованої системи ІБС. Роздільна здатність CCD-камери по осях  $x$  та  $y$  по суті визначає частоту дискретизації інтерферометричного зображення. Важливим

також є такі характеристики камери як чутливість та розрядність представлення окремого пікселя, а також частота реєстрованих кадрів.

Опрацювання зареєстрованих в CCD-камері та оцифрованих інтерферограм білого світла здійснюється у спеціалізованому обчислювачі у два етапи (рис. 2.2).

Завданням першого етапу опрацювання є прорідження захоплених із цифрової камери кадрів з метою усунення подібних інтерферограм та відбору лише тих, що несуть певне інформаційне навантаження. Опісля відібрані інтерферограми знешумлюються. Таким чином, комп'ютеризована система на першому етапі опрацювання кадрів забезпечує підвищення ентропії відібраних інтерферограм та збільшення відношення сигнал/шум.

Другий етап опрацювання інтерферограми підпорядкований виконанню тієї чи іншої вимірювальної задачі. У випадку дослідження топології поверхні таке опрацювання представляє собою реалізацію одного із розроблених у розділі 3 методів реконструкції топології поверхні із інтерферограми білого світла.

У багатьох випадках така комп'ютерна система може експлуатуватися не лише у лабораторних умовах, як стаціонарна система, але як переносна (мобільна) система, до якої ставляться жорсткі вимоги щодо масо-габаритних показників загалом та низької споживаної потужності спеціалізованого обчислювача зокрема. Тому в роботі було проаналізовано можливість реалізації спецпроцесора оброблення інтерферометричних зображень і спецпроцесора оброблення інтерферометричних сигналів на різних обчислювальних платформах, в тому числі й для вбудованих комп'ютерних систем.

Згідно сформульованого в дисертації завдання, потрібно розробити методи придатні до реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними в часі параметрами, наприклад поверхні мембрани сенсорів тиску. Це висуває високі вимоги щодо швидкодії комп'ютерної системи, тому важливо забезпечити високу обчислювальну ефективність і точність методів та алгоритмів реконструкції топології поверхні.

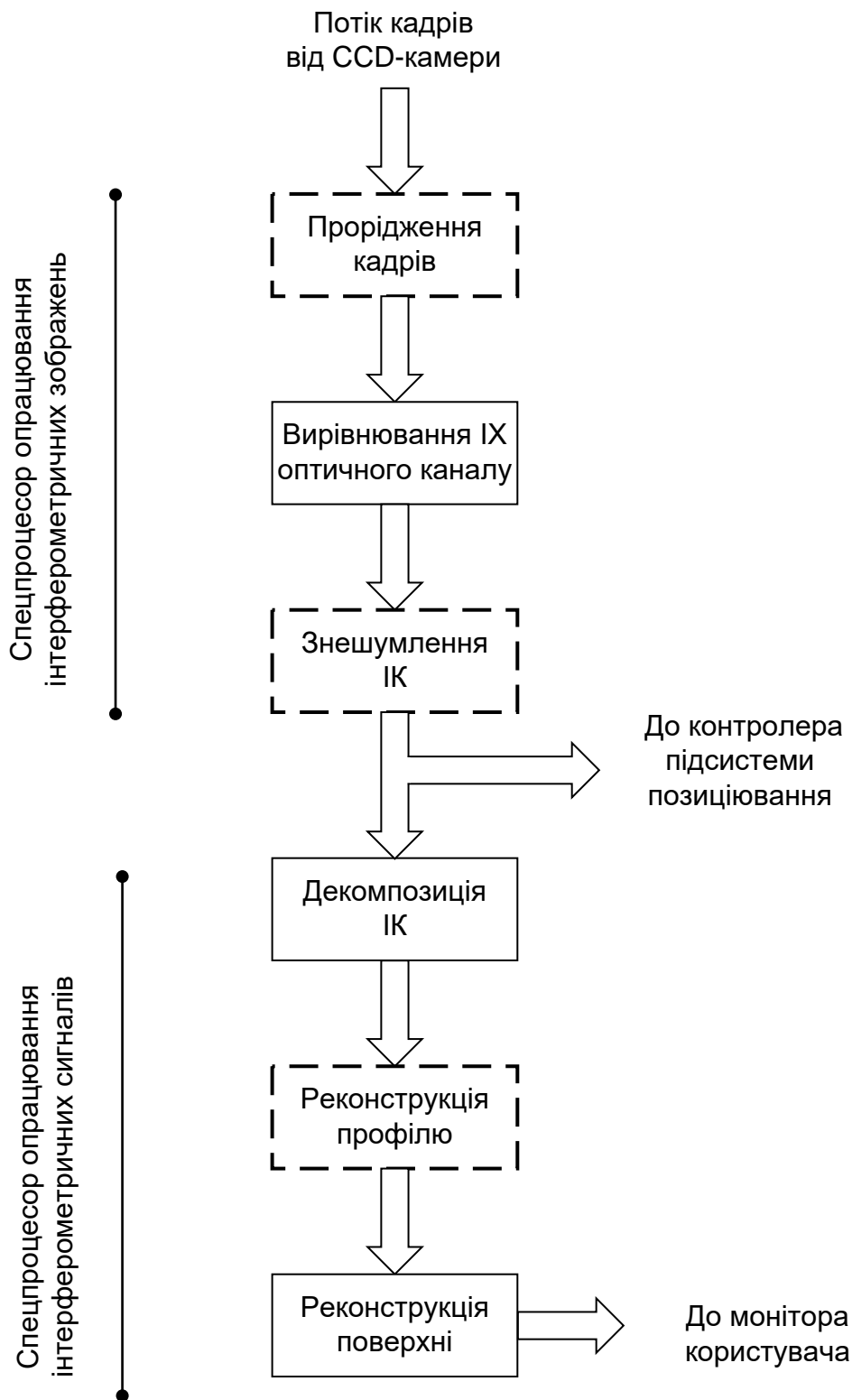


Рис. 2.2. Етапи опрацювання даних у спеціалізованому обчислювальовачі

## 2.2. Модель вимірювального каналу комп'ютерної інтерферометричної системи

Під час визначення топології поверхні досліджуваного об'єкту на результати вимірювання впливають похибки як інтерферометра, так і спеціалізованого обчислювача.

Розглянемо фактори, які можуть мати дестабілізуючий вплив на точність реконструкції топології поверхні з боку інтерферометра. Робота інтерферометра, як і будь-якого оптичного пристрою, супроводжується впливом шумів та нелінійними оптичними спотвореннями реєстрованих зображень [54]. На тлі доступності та неперервного здешевлення обчислювальних засобів видається доцільним спрямувати зусилля щодо підвищення точності інтерферометричних вимірювань шляхом удосконалення методів опрацювання даних інтерферогрми, а не удосконалення оптичної частини комп'ютеризованої системи.

Модель вимірювального каналу інтерферометра, яка враховує спотворення зумовлені оптичними, механічними та електронними вузлами, а також впливом зовнішніх шумів наведено на рис. 2.3 [54].

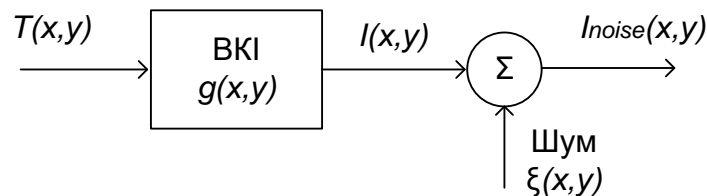


Рис. 2.3. Модель вимірювального каналу інтерферометра (ВКІ) із врахуванням впливу спотворень

У моделі мультиплікативний вплив лінійних та нелінійних спотворень відображає імпульсна характеристика оптичного каналу  $g(x,y)$ , а наявність адитивних шумів представлена складовою  $\xi(x,y)$  [55]:

$$I_{noise}(x,y) = I(x,y) + \xi(x,y) = g(x,y) * T(x,y) + \xi(x,y), \quad (2.1)$$

де  $T(x,y)$  – параметр, що містить інформацію про топологію поверхні (висоту у кожній точці поверхні з координатами  $(x,y)$ );

$I(x,y)$  – сигнал інтенсивності інтерферограми із лінійними та нелінійними спотвореннями;

символ «\*» – оператор згортки.

Як відомо згортка функцій в просторовій області еквівалентна перемноженню зображень цих функції в області просторової частоти із аргументами  $u=1/x$  та  $v=1/y$  [55]:

$$F_I(u,v) = G(u,v) \times F_T(u,v) + F_\xi(u,v), \quad (2.2)$$

де  $F_I(u,v)$ ,  $F_T(u,v)$ ,  $F_\xi(u,v)$  – відповідно зображення інтерферограми, топології поверхні та шуму в області просторової частоти;

$G(u,v)$  – оптична передатна функція вимірювального каналу інтерферометра.

Загальноприйнятим підходом зменшення впливу шумів, як випадкового процесу, на результати вимірювання є фільтрація. На цей час розроблено методи фільтрації зображень у просторовій та частотній областях [56]. Параметри цифрових фільтрів залежать від характеру шуму. Заслуговує на увагу можливість знешумлення зображень з використанням апарату вейвлет-перетворення. Питання знешумлення інтерферограм розглянуто у розділі 4.

Забезпечити інваріантність до впливу імпульсної характеристики  $g(x,y)$  можна шляхом калібрування вимірювального каналу. Якщо у рівнянні (2.1) будуть відомі функція калібрувальної поверхні  $T_O(x,y)$  і результат знешумленого зображення  $I_O(x,y)$ , то є можливість визначити інверсну імпульсну характеристику (характеристику еквайзера)  $g^{-1}(x,y) = T_O(x,y) / I_O(x,y)$  та усунути вплив спотворень оптичного каналу інтерферометра у процесі дослідження поверхонь із невідомими параметрами:

$$I_{denoised}(x,y) = g(x,y) * g^{-1}(x,y) * T(x,y) + \xi_{\downarrow}(x,y),$$

У п. 4.3 наведено результати досліджень ефективності відомих методів щодо знешумлення інтерферограм білого світла.

Проаналізуємо фактори, які знижують обчислювальну ефективність і точність з спеціалізованого обчислювача комп'ютерної системи ІБС. Як

зазначалося вище, будуть розроблятися та досліджуватися методи реконструкції топології поверхні із однієї інтерферометричної картини, тому неточність позиціонування досліджуваного об'єкту не має впливу на результати реконструкції [7,22,26].

Інтервал  $T_s$  вибірок окремих інтерферограм визначається максимальною частотою  $F_{max}$  контрольованого фізичного процесу за відомими співвідношенням:

$$T_s \leq \frac{1}{2F_{max}} \quad (2.3)$$

У межах цього інтервалу необхідно виконати усі обчислення для реконструкції топології поверхні із окремої інтерферограми, звідси важливість обчислювальної ефективності методів реконструкції.

Для додаткового підвищення обчислювальної ефективності КС ІБС у роботі запропоновано новий метод прорідження кадрів. Його суть полягає у відборі із потоку зареєстрованих цифровою камерою інтерферограм лише некорельованих, тобто тих, які перевищують заданий користувачем поріг ентропії. Дослідженню цього методу та питанням його імплементації присвячено п. 4.1.

Інтерферограма, як зображення, є двовимірною функцією  $I(x,y)$ , де  $x$  та  $y$  просторові координати, а  $I$  – інтенсивність (рівень освітленості у заданій точці). Зображення може мати неперервні  $x$  та  $y$  координати, а також неперервний рівень  $I$ . У CCD-камері світлочутлива матриця виконана у вигляді окремих комірок (пікселів), які накопичують заряд пропорційний інтенсивності освітлення. Таким чином. одержують дискретизоване, але ще не цифрове зображення. Для одержання цифрового зображення потрібно проквантувати рівні інтенсивності окремих пікселів. Переважно обмежуються однобайтовою розрядністю, за якої 0 відповідає нульовій інтенсивності, а 255 – максимальній. Отже цифрове зображення є матрицею із  $n$  стовпцями та  $m$  рядками.

Збільшення латеральної роздільної здатності (по осях  $x$  та  $y$ ) та розрядності репрезентації інтенсивності окремого пікселя підвищує точність методів реконструкції, але це супроводжується зростанням обчислювальної складності. Як

показує практика, в інтерферометрії білого світла достатньо застосувати CCD-камери із числом пікселів близько  $1000 \times 1000$ .

Реальні геометричні розміри поверхні контрольованого об'єкту вимірюються у міліметрах ( $0 \div X$  [мм];  $0 \div Y$  [мм]), натомість цифрове зображення подається набором пікселів, координати яких знаходяться у діапазоні ( $0 \div N$ ,  $0 \div M$ ). Тому координати цифрового зображення  $(n, m)$  можуть бути перераховані в реальні  $(x = n \times X/N, y = m \times Y/M)$ . Під час розроблення та дослідження методів реконструкції застосовано координати пікселів.

Відомі та досліджувані у роботі алгоритми реконструкції базуються на застосуванні чисельних методів, наприклад, перетворення Фур'є, перетворення Гілберта, яким притаманні певні обмеження як з точки зору обчислювальної ефективності, так і точності. Це має безпосередній вплив на точність реконструкції топології поверхні досліджуваного об'єкту.

### **2.3. Особливості реконструкції топології поверхні із інтерферограми білого світла**

Одним із завдань дисертаційних досліджень є підвищення обчислювальної ефективності та точності методів реконструкції поверхні мембрани сенсорів тиску. Особливістю такого об'єкту є:

- змінна в часі топологія поверхні;
- кривизна тобто нелінійність реконструйованої поверхні.

Зазначені особливості, а саме – нестационарність і нелінійність досліджуваної поверхні, роблять неефективними відомі методи реконструкції, порівняльний аналіз яких подано у п. 1.4. Нестационарність об'єкту зумовлює відповідну зміну інтерферограмної картини, а це висуває часові обмеження на тривалість реконструкції топології поверхні. У зв'язку з цим, ставиться задача реконструювання поверхні об'єкта на основі окремо зареєстрованої інтерферограми, причому моменти реєстрації інтерферограм вибираються на основі співвідношення (2.3).

Беручи до уваги специфіку контрольованого об'єкту, проаналізуємо насамперед математичну модель та спектр інтерферограми білого світла, оскільки методи реконструкції базуються на опрацюванні сигналу як у просторовій області (spatial domain), де аргументом є відстань [м], так і в частотній області (frequency domain), де аргументом є просторова частота [м<sup>-1</sup>].

Аналітичний вираз сигналу інтенсивності інтерферограми (1.6) дає підстави зробити висновок, що інформативний параметр – оптична різниця ходу  $T$  – є аргументом одночасно як функції огинаючої амплітуди (Envelope)

$$E(T) = I_M \cdot \exp\left(-\frac{8 \cdot T^2 \cdot \Delta\lambda^2}{\lambda_0^4}\right), \quad (2.4)$$

так і несучої частоти (Carrier)

$$C(T) = \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot T\right). \quad (2.5)$$

Отже, можливі два шляхи визначення необхідного для реконструкції поверхні інформативного параметра  $T$  – або із огинаючої амплітуди, або із несучої частоти сигналу інтерферограми. Проте одночасна залежність ускладнює задачу виділення параметра  $T$ . Наприклад, під час визначення  $T$  із повної фази несучої наявність огинаючої амплітуди сигналу виступає дестабілізуючим фактором, який знижує точність. Тому у розроблюваних методах реконструкції потрібно забезпечити інваріантність до взаємного впливу одна на одну огинаючої чи несучої частоти сигналу.

Проаналізуємо вплив кривизни поверхні об'єкту на вигляд сигналу інтерферограми та форму її складових. Для порівняння виберемо лінійну поверхню (коли кривизна відсутня) та сферичну поверхню, що відображає топологію мембрани. Сигнали інтерферограми та їх компоненти (несуча частоти та огинаюча амплітуди) для обох типів поверхонь показано на рис. 2.4.



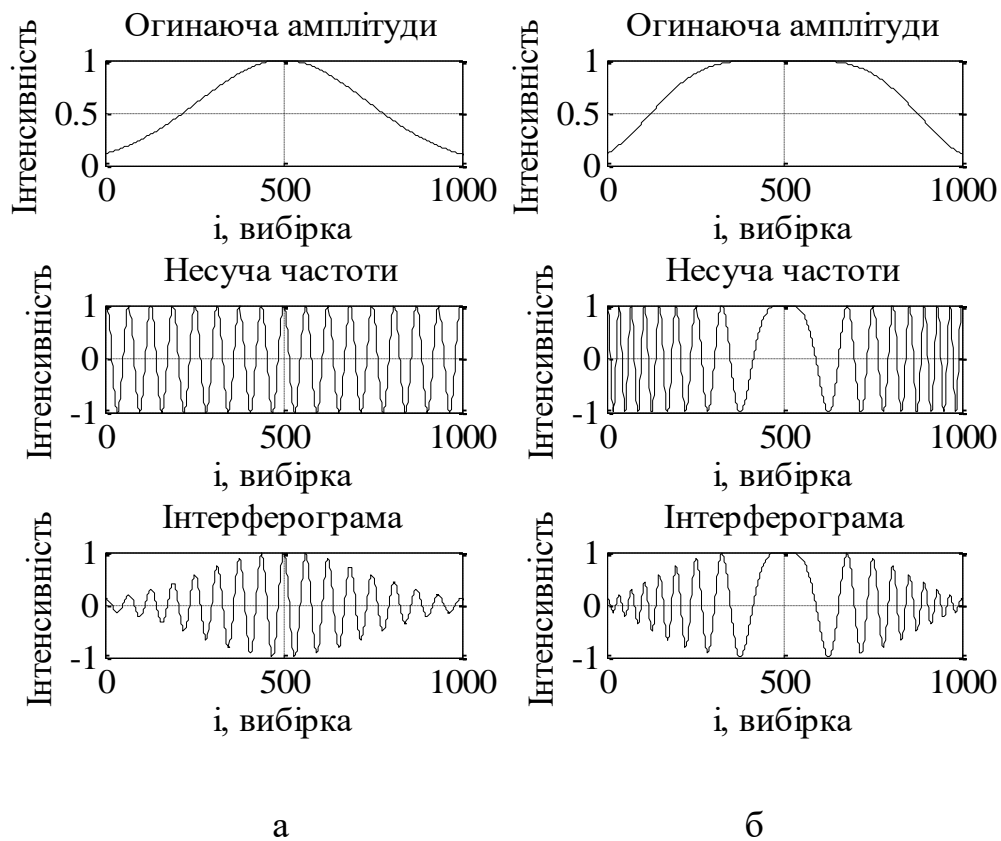


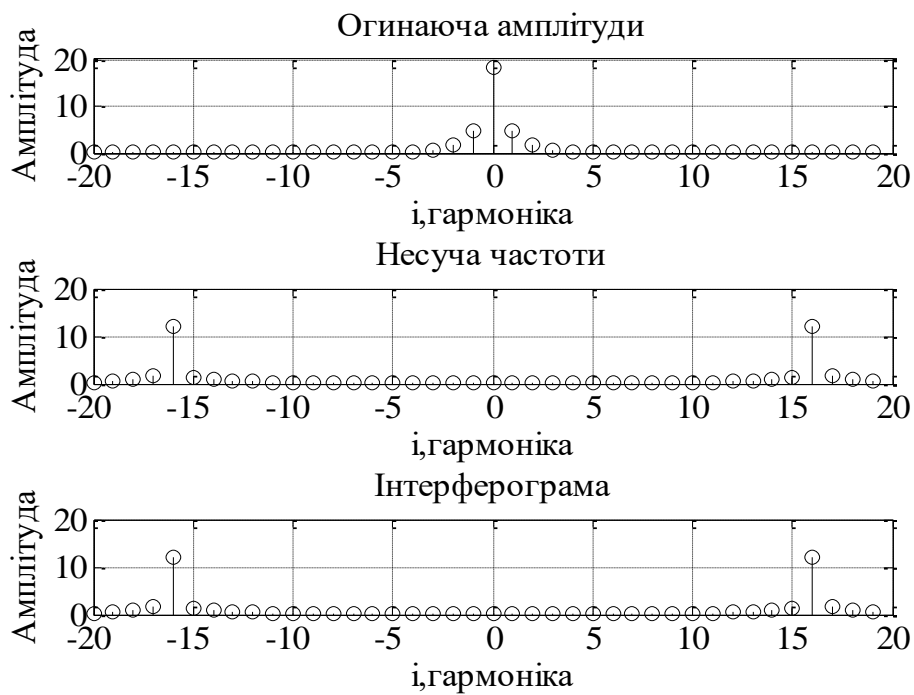
Рис. 2.4. Сигнал інтенсивності та його складові:  
а – лінійна, б – сферична поверхня

Кривизна поверхні впливає на форму огинаючої амплітуди, але цей вплив особливо помітний на несучу частоту сигналу і проявляється він зміною частоти несучої для сферичної поверхні.

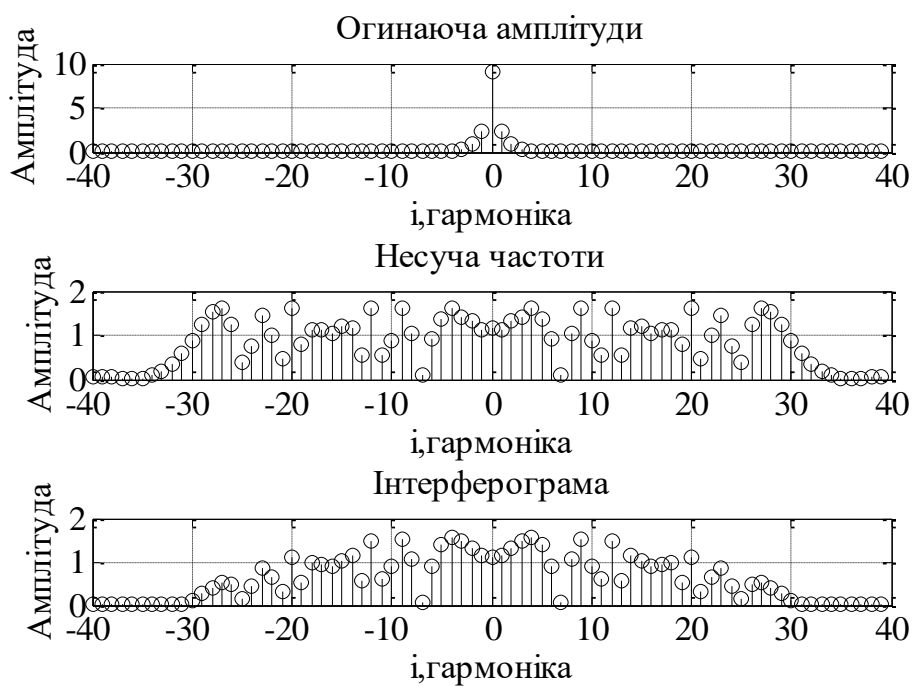
Як відомо, аналіз частотних властивостей сигналу зручніше виконувати не у часовій, а у частотній області. Оскільки сигнал інтерферограми  $I(T)$  описується добутком в огинаючої амплітуди сигналу  $E(T)$  і несучої частоти сигналу  $C(T)$ , то його спектр  $S_I(T^{-1})$  буде відповідно згорткою спектрів огинаючої амплітуди  $S_E(T^{-1})$  і несучої частоти  $S_C(T^{-1})$  у області просторової частоти:

$$S_I(T^{-1}) = S_E(T^{-1}) * S_C(T^{-1}). \quad (2.6)$$

Вигляд спектрів сигналів інтерферограм та їх складових для лінійної і сферичної поверхонь наведено на рис. 2.5.



а



б

Рис. 2.5. Спектри сигналів інтенсивності та їх складових:  
а – лінійна, б – сферична поверхня

Як видно із наведених рисунків, спектри огинаючих амплітуди для лінійної та сферичної поверхонь відрізняються незначно. Найбільша різниця

спостерігається у спектрі несучих для лінійної та сферичної поверхонь, а відтак і спектри сигналів інтерферограми для цих поверхонь принципово відрізняються.

Для лінійної поверхні частота несучої сигналу стала, тому утворення інтерферограми можна розглядати як процес амплітудної модуляції. Спектри огинаючої амплітуди та несучої частоти сигналу інтерферограми у цьому випадку рознесені на осі частот, що відкриває можливості застосування методів реконструкції, що базуються на опрацюванні сигналу у частотній області.

Спектр несучої частоти сигналу для сферичної поверхні є значно складніший і ширший, ніж для лінійної, що зумовлено частотною модуляцією. Отже, у випадку сферичної поверхні змінюється не лише амплітуда огинаючої, але і частота несучої сигналу, що рівносильне змішаній амплітудно-частотній модуляції. У центрі інтерферограми частота несучої сигналу різко спадає, тому у області низьких частот спостерігається накладання спектрів огинаючої амплітуди та несучої частоти. Отже, можна очікувати проблеми із застосуванням методів реконструкції сферичних поверхонь, що базуються на перетворенні Фур'є.

Потрібно зазначити, що за аналізу фази несучої сигналу можна досягнути вищої чутливості та точності, ніж при аналізі амплітуди огинаючої. Крім того, частота чи фаза, як інформативний параметр, порівняно з амплітудою є стійкішою до впливу завад. Отже, доцільним є розроблення методів для визначення топології поверхні із фази несучої інтерферограми.

#### **2.4. Методика оцінювання обчислювальної ефективності та точності розроблених методів реконструкції топології поверхні**

Дослідження методів реконструкції топології поверхні виконано в програмному пакеті MATLAB, оскільки це є потужний інструмент для проведення наукових досліджень. Він містить розбудовану бібліотеку функцій у різних галузях знань, які є оптимізовані для конкретних комп'ютерних платформ.

Порівняльний аналіз усіх розроблених методів реконструкції проведено за двома критеріями - обчислювальної ефективності та точності. Кількісним показником обчислювальної ефективності обрано число арифметичних операцій

(додавання і множення), які має виконати процесор обчислювального пристрою для реконструкції однієї точки поверхні. Точність оцінювалася за такими параметрами як середньоквадратична і максимальна зведені похибки.

Кількість арифметичних операцій, як показника обчислювальної ефективності, вочевидь, залежатиме від виду аналітичних виразів, за якими для кожного із розроблених у роботі методів обчислюється висота поверхні, що відповідає кожній точці інтерферограми. До аналітичних виразів, крім операцій додавання і множення, які в сучасних обчислювальних пристроях процесор виконує за один такт, входять також операції ділення, піднесення до степеня, в тому числі добування квадратного кореня, логарифмування, а також обчислення значень тригонометричних функцій.

Всі зазначені вище математичні операції реалізуються через додавання і множення із використанням наближених чисельних та ітеративних методів, як наприклад, метод Ньютона-Рафсона для ділення або розклад функцій у поліноміальний ряд Тейлора (логарифм, арккосинус, арктангенс, квадратний корінь) [57,58,59]. Виходячи з цього, складність методу реконструкції поверхні в подальшому буде оцінюватися кількістю операцій додавань і множень, що лежать в його основі.

Щоб дати порівняльну характеристику обчислювальної ефективності розроблених у роботі методів, насамперед необхідно проаналізувати апроксимаційні вирази, за якими у цифровій техніці обчислюються значення перерахованих вище функцій.

Формули для наближеного розрахунку базових нелінійних алгебраїчних та тригонометричних функцій операції подано нижче:

$$\sqrt{x+1} = 1 - \frac{1}{2}x + \frac{3}{8}x^2 - \frac{15}{48}x^3 + \dots, -1 < x \leq 1 \quad (2.7)$$

$$\ln(x+1) = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 + \dots + \frac{(-1)^k}{k} \cdot x^k, -1 < x \leq 1 \quad (2.8)$$

$$\tan^{-1}(x) = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5 + \dots + \frac{(-1)^{k+1}}{2k+1} \cdot x^{2k+1}, -1 < x \leq 1 \quad (2.9)$$

$$\cos^{-1}(x) = \frac{\pi}{2} - \left( x + \frac{1}{6}x^3 + \frac{3}{40}x^5 + \frac{15}{336}x^7 + \dots \right), -1 < x \leq 1 \quad (2.10)$$

По суті всі ці функції апроксимуються поліномами певного порядку, а ефективність їх обчислення залежить від кількості ітерацій чи членів розкладу. При цьому використання кожного наступного члену ряду означає збільшення кількості множень на 2 і одне додавання. Отже, кількість операцій додавань і множень залежить передовсім від числа  $k$  членів апроксимаційного ряду і для кожної із зазначених вище функцій не перевищує:

$$O(f) = 3k - 1 \quad (2.11)$$

де  $f$  – будь-яка із набору функцій *sqrt*, *log*, *atan*, чи *acos*.

Обернене значення можна обчислити на основі такої ітеративної залежності:

$$\frac{1}{x} = y_i = y_{i-1}(2 - x \cdot y_{i-1}) \quad (2.12)$$

де  $x$  – число для якого шукається обернене значення;  $y_i$  – наближено обчислене обернене значення числа  $x$ ;  $i$  – крок ітерації.

Отже, кількість додавань і множень, які необхідно затратити для виконання операції ділення, складає

$$O\left(\frac{1}{x}\right) = 3i \quad (2.13)$$

Розробленню методів реконструкції присвячено 3 розділ, де конкретні вирази уможливають обчислення кількості операцій для реконструкції профілю поверхні, на основі опрацювання одного рядка інтерферограми. Зіставлення обчислювальної ефективності усіх методів для реконструкції топології поверхні із урахуванням точності подано у п.4.1. Задля коректного і універсального порівняння складності методів реконструкції поверхні враховуємо лише базові способи реалізації обчислень, хоча на практиці існують спеціалізовані методи, більш швидкі і оптимізовані для імплементації на конкретні типи обчислювальних засобів та розрядності.

Для аналізу власних похибок розроблених методів без урахування впливу шумів та спотворень дослідження спершу проводилися на модельованих даних. Для досліджень вибрано два типи поверхонь: лінійна та сферична, які зображено на рис. 2.6. Як зазначалося, сферична поверхня є моделлю мембрани сенсора тиску, а лінійна поверхня дає змогу виключити вплив нелінійностей на точність реконструкції. За потреби, лінійну поверхню зручно використати для калібрування інтерферометра. Крім того, лінійна поверхня виступає у задачах вимірювання дуже малих кутів нахилу плоских об'єктів.

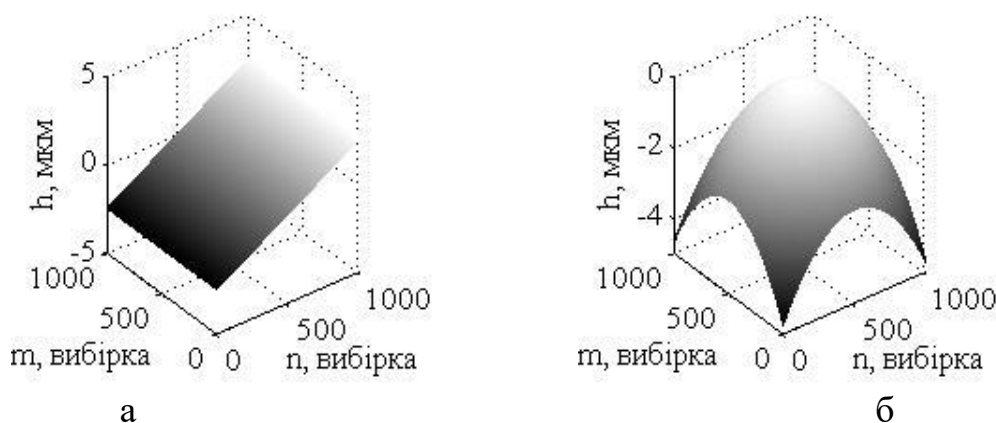


Рис. 2.6. Вигляд модельованих лінійної (а) та сферичної (б) поверхонь

Моделювання лінійної поверхні проводилося за виразом:

$$h(n, m) = a \cdot \left( n - \frac{N}{2} \right) \cdot X_s + b = \tan(\alpha) \cdot \left( n - \frac{N}{2} \right) \cdot X_s + b, \quad (2.14)$$

де  $h$  – висота точки поверхні;

$n$  та  $m$  – номери вибірок по осях  $x$  та  $y$  відповідно;

$N = 1000$  – кількість пікселів по осі  $x$ ;

$X_s = 100$  мкм – інтервал дискретизації по осі  $x$ ;

$a$  і  $b$  – коефіцієнти лінійного рівняння, причому  $b=0$  (зміщення по осі  $y$ );

$\alpha = 500$  мкррад – кут нахилу поверхні відносно осі  $x$ .

Математична модель сферичної поверхні має вигляд [60]:

$$h(n, m) = - \frac{h_0 \cdot \left[ \left( n - \frac{N}{2} \right)^2 \cdot X_S^2 + \left( m - \frac{M}{2} \right)^2 \cdot Y_S^2 \right]}{R^2}, \quad (2.15)$$

де  $M = 1000$  – кількість пікселів по осі  $y$ ;

$Y_s = 100$  мкм – інтервал дискретизації по осі  $y$ ;

$R = 1$  мм – радіус сфери;

$h_0 = 0,1$  мкм – висота сегменту сфери.

Застосовуючи математичну модель ІБС (1.6), можна синтезувати інтерферограми білого світла для модельованих поверхонь. Вигляд інтерферограми залежить від параметрів джерела світла – для однієї і тієї самої поверхні за використання різних джерел світла одержують різні інтерферограми. Для моделювання вибрано параметри джерела світла та CCD-камери, які відповідають паспортним даним інтерферометра, на якому виконувалися реальні дослідження. До таких параметрів належать:

- стала складова сигналу -  $I_0 = 2$ ;
- модуляційна амплітуда -  $I_M = 2$ ;
- центральна довжина хвилі -  $\lambda_0 = 620$  нм;
- відхилення довжин хвиль (ширина спектру) -  $\Delta\lambda = 62$  нм;
- кількість даних по осях  $x$  та  $y$  -  $1000 \times 1000$  точок.

На основі моделі із поданими параметрами синтезовано інтерферограми лінійної (а) та сферичної (б) поверхонь, що зображені на рис. 2.7.

Для спрощення аналізу розроблені методи спочатку апробувалися для реконструкції не топології поверхні (тривимірна задача – 3D), а профілю (двовимірна задача – 2D) модельованих поверхонь поданих на рис. 2.6, тобто для одного рядка інтерферограми. Оскільки для лінійної поверхні профілі збігаються, то сигнал не міняється по осі  $y$ , тому аналіз виконувався для одного рядка (рис. 2.8, а). У випадку сферичної поверхні профіль змінюється по осі  $y$ , тому для дослідження вибрано центральний та віддалений від центру (50-тий) рядок

інтерферометричної картини (рис. 2.7, б). Відповідні сигнали інтерферограми сферичної поверхні зображено на (рис. 2.8, б) та (рис. 2.8, в).

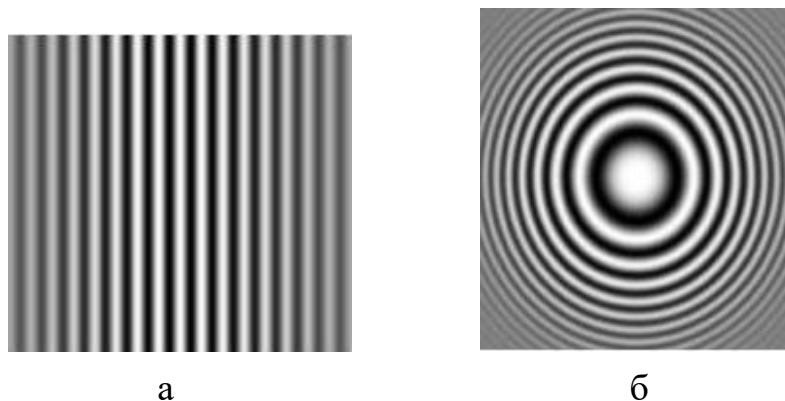


Рис. 2.7. Вигляд інтерферограми білого світла для модельованих поверхонь: а – лінійна, б – сферична

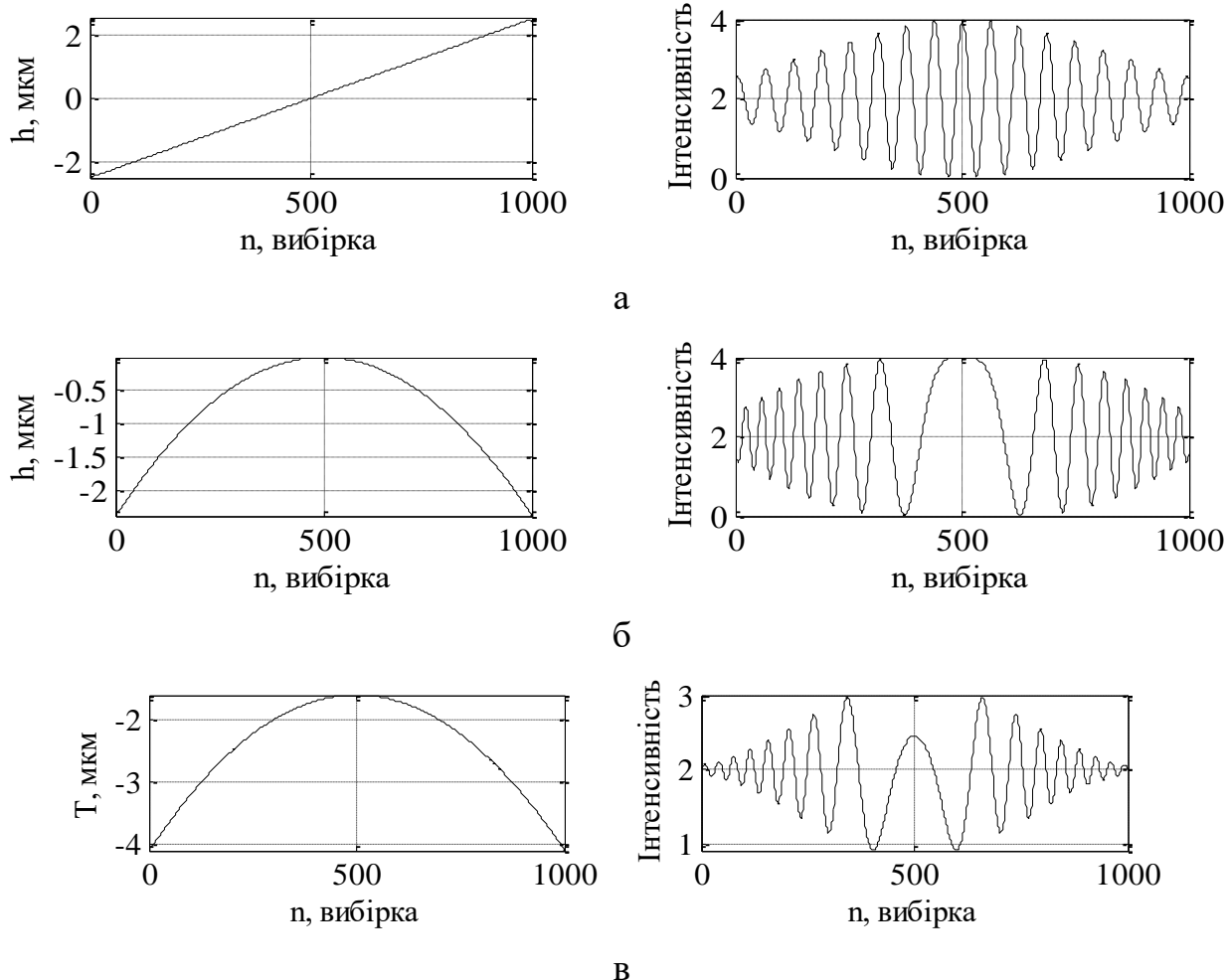


Рис. 2.8. Профіль досліджуваної поверхні та відповідний сигнал інтерферограми: а – лінійна поверхня, б – сферична поверхня, центральний рядок, в – сферична поверхня, віддалений від центру 50-тий рядок



Як видно із рис. 2.8, б і рис. 2.8, в, для різних рядків сигнали інтерферограми сферичної поверхні відрізняються не лише рівнем, але і формою.

Після аналізу точності методів реконструкції окремого профілю, здійснюється адаптація методів для реконструкції всієї поверхні (3D випадок).

Для порівняння розроблених методів реконструкції топології поверхні проводилося оцінювання точності та обчислювальної ефективності.

Проводити оцінювання точності методів реконструкції шляхом обчислення відносної похибки не вдається, через наявність нульових значень у знаменнику виразу похибки. Тому застосовано вираз зведеної похибки:

$$\gamma(T) = \frac{|h_{rec} - h_{origin}|}{\max(h_{origin}) - \min(h_{origin})} \cdot 100\% , \quad (2.16)$$

причому зведення відбувається до діапазону можливих мінімального та максимального значень висоти досліджуваної поверхні.

Для інтегральної оцінки точності методів реконструкції профілю чи топології поверхні, обчислюється середньоквадратична зведена похибка за формулою:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [h_{rec}(i) - h_{origin}(i)]^2}}{N \cdot [\max(h_{origin}) - \min(h_{origin})]} \cdot 100\% , \quad (2.17)$$

де  $h_{rec}(i)$  та  $h_{origin}(i)$  – висота реконструйованої та оригінальної поверхонь у точці  $i$ ;  $N$  – кількість вибірок.

По суті величини оптична різниця ходу  $T$  і геометрична висота  $h$  є рівнозначними у випадку моделювань, зокрема синтезу і реконструкції поверхні.

Для оцінювання ефективності методів реконструкції запровадимо коефіцієнт обчислювальної складності, який визначатиметься кількістю операцій множень/ділень необхідних для реконструкції однієї точки поверхні.

У реальних умовах реєстрація інтерферограм супроводжується впливом шумів. Для зменшення дестабілізуючого впливу шумів застосовують різні методи знешумлення, ефективність яких залежить як від характеру самого зображення, так

і від параметрів шуму як випадкового процесу. Для оцінювання ефективності методів знешумлення та вибору кращого із них застосовано методику, яка передбачає формування інтерферограми із відомими параметрами і накладання випадкового просторового шуму із нормальним розподілом.

Для перевірки адекватності математичних моделей і прийнятих допущень потрібно провести апробацію методів реконструкції інтерферограм, одержаних у ході експериментальних досліджень на реальних даних.

### **Висновки до 2 розділу**

1. Розроблено концепцію побудови комп'ютерної системи ІБС дослідження топології поверхні, яка передбачає розподіл обчислювальних задач між двома спецпроцесорами. На першому етапі спецпроцесор відбирає інформативні інтерферографічні зображення та знешумлює їх, а на другому – інший спецпроцесор на основі опрацювання окремої інтерферограми за одним із розроблених методів реконструює топологію поверхні.
2. Розроблено модель спотворень вимірювального каналу інтерферометра та доведено необхідність застосування обчислювальних засобів для компенсації оптичних спотворень і знешумлення інтерферограм. Обґрунтовано вибір та подано коротку характеристику методів реконструкції топології поверхні, розробленню та дослідженню яких присвячена дисертація.
3. Обґрунтовано методику оцінювання обчислювальної ефективності та точності методів реконструкції топології поверхні. Кількісним показником обчислювальної ефективності є число операцій додавань і множень, які затрачає спецпроцесор на реконструкцію одного пікселя поверхні, а для оцінювання точності застосовано зведену і середньоквадратичну похибки реконструкції.
4. Розроблено методологію наукових досліджень, яка передбачає:

- формування моделей лінійної та сферичної поверхонь, синтез на їх основі інтерферограм із параметрами наближеними до реальних;
- дослідження розроблених методів на спрощеній 2D задачі реконструкції профілю поверхні із подальшою адаптацією до 3D задачі реконструкції топології поверхні.

### РОЗДІЛ 3

## МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ПРОФІЛЮ ПОВЕРХНІ КОМП'ЮТЕРНИМИ ЗАСОБАМИ

Цей розділ присвячено розробленню нових і вдосконаленню відомих методів реконструкції профілю поверхні із інтерферограми білого світла. У зв'язку із великим обсягом і складністю обчислень ці методи можуть реалізовуватися лише обчислювальними (комп'ютерними) засобами. Залежно від того, як здійснюється комп'ютерне опрацювання інтерферограми, методи реконструкції поділені на дві групи: методи просторової області та методи частотої області.

Першу групу представляють:

- метод реконструкції із фази сигналу інтенсивності інтерферограми, унормованого інтерпольованою огибаючою амплітуди (метод НІ);
- метод реконструкції на основі поліноміальної апроксимації окремих сегментів сигналу інтенсивності інтерферограми (метод ПА);
- метод реконструкції, що базується на адаптації моделі комплексних експонент (моделі Проні) до сигналу інтенсивності (метод МП).

До другої групи належать методи, що базуються на моделі аналітичного сигналу, який одержують за допомогою дискретного перетворення Гільберта:

- метод реконструкції із оцінки за Гільбертом огибаючої амплітуди сигналу інтенсивності інтерферограми (метод ОГ);
- метод реконструкції із фази сигналу інтенсивності, унормованого за допомогою оцінки за Гільбертом огибаючої амплітуди (метод НГ);
- метод реконструкції із миттєвої фази аналітичного сигналу інтенсивності (метод ФА);
- метод реконструкції із логарифмованого аналітичного сигналу інтенсивності (метод ЛА).

Оскільки практична реалізація перетворення Гільберта спирається на алгоритм швидкого перетворення Фур'є, ці методи віднесені до області просторової частоти.

### 3.1. Метод реконструкції профілю поверхні із фази сигналу інтенсивності інтерферограми, унормованого інтерпольованою огинаючою амплітуди

Для реконструкції профілю поверхні необхідно визначити оптичну різницю ходу  $T$ , оскільки цей параметр безпосередньо пов'язаний із висотою поверхні у кожній її точці. Проведений у п. 2.3 аналіз математичної моделі сигналу  $I(T)$  інтерферограми білого світла показав наявність у сигналі двох компонент – огинаючої амплітуди  $E(T)$  та несучої частоти  $C(T)$  сигналу. Також встановлено, що інформативний параметр  $T$  одночасно входить до цих двох компонент сигналу, тому з погляду теорії сигналів утворення інтерферограми можна трактувати як змішану амплітудно-фазову модуляцію.

Отже, одержати інформативний параметр  $T$  із сигналу інтерферограми білого світла можна шляхом амплітудної або фазової демодуляції. На практиці варіант фазової демодуляції виглядає привабливішим із двох причин:

- фаза чи частота, як інформативний параметр, для вимірювання або опрацювання є завадостійкішою порівняно із амплітудою;
- існує пряма залежність параметра  $T$  із повною фазою несучої частоти  $C(T)$ , натомість зв'язок із амплітудою огинаючої  $E(T)$  є нелінійним.

Дослідження показали, що зумовлене низькою когерентністю джерела білого світла згасання інтенсивності сигналу має негативний вплив на результати частотної демодуляції. Таким чином, наявність у інтерферограмі білого світла огинаючої амплітуди  $E(T)$ , що описується функцією Гауса [19], ускладнює завдання реконструкції профілю поверхні. Для забезпечення інваріантності результатів реконструкції до впливу огинаючої амплітуди пропонується застосувати нормалізацію інтерферограми. Суть цього підходу полягає у визначенні форми огинаючої амплітуди і нормуванні інтерферограми за формулою:

$$I_{norm}(n) = \frac{I(T)}{\tilde{E}(T)} = \frac{E(T) \times C(T)}{\tilde{E}(T)} \approx \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot T_n\right), \quad (3.1)$$

де  $I_{norm}(n)$  – унормований сигнал інтенсивності інтерферограми;

$n$  – номер вибірки сигналу;

$I(T)$  – сигнал інтенсивності інтерферограми із вилученою сталою складовою;  
 $\tilde{E}(T)$  – оцінка огинаючої амплітуди сигналу інтенсивності інтерферограми;  
 $T_n$  – значення інформативного параметра у  $n$ -ій точці сигналу інтенсивності.

Питанню визначення оцінки огинаючої амплітуди із сигналу інтенсивності інтерферограми присвячено п. 3.1.2. Як випливає із (3.1), у випадку точного визначення оцінки огинаючої амплітуди, тобто  $\tilde{E}(T) = E(T)$ , унормований сигнал інтенсивності збігається із несучою частоти:

$$I_{norm}(n) = \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot T_n\right). \quad (3.2)$$

Але навіть за ідеального унормування сигналу інтенсивності, визначення профілю поверхні (інформативного параметра  $T_n$ ) пов'язане із вирішенням задачі періодичності функції косинус (див.п.3.1.1). Справді, у рівнянні

$$y = \cos(\Phi) \quad (3.3)$$

втрачається інформація про повну фазу  $\Phi$  і подається єдиний його розв'язок

$$y = \cos[\Phi \bmod(\pi)] = \cos(\phi) \quad (3.4)$$

у межах інтервалу  $\phi \in [0; \pi]$ .

### **3.1.1. Визначення інформативного параметра із фази несучої сигналу інтенсивності інтерферограми**

Інформативний параметр  $T_n$  із рівняння (3.2) можна визначити за допомогою функції арккосинус

$$T_n = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \pi} \arccos[I_{norm}(n)]. \quad (3.5)$$

Однією із проблем є невизначеність розв'язків функції арккосинус, оскільки на інтервалі її визначеності

$$-1 \leq x \leq 1 \quad (3.6)$$

існує багато значень

$$y = \pm \arccos(x) + 2 \cdot \pi \cdot k, \quad k \in \mathbb{Z}. \quad (3.7)$$

Щоб усунути багатозначність функції арккосинус, її область значень обмежують інтервалом монотонності

$$0 \leq y \leq \pi, \quad (3.8)$$

що називають головним значенням арккосинуса (рис.3.1).

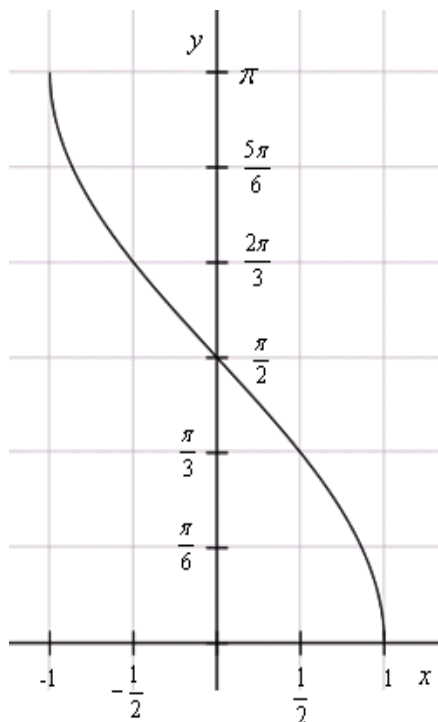


Рис. 3.1. Графік головних значень функції арккосинус

Іншою проблемою є невизначеність знаку функції арккосинус. Наприклад, двом протилежним за знаком аргументам функції косинус  $\phi = -\pi/3$  і  $\phi = \pi/3$  відповідає одне значення функції  $y=0,5$  (рис. 3.2).

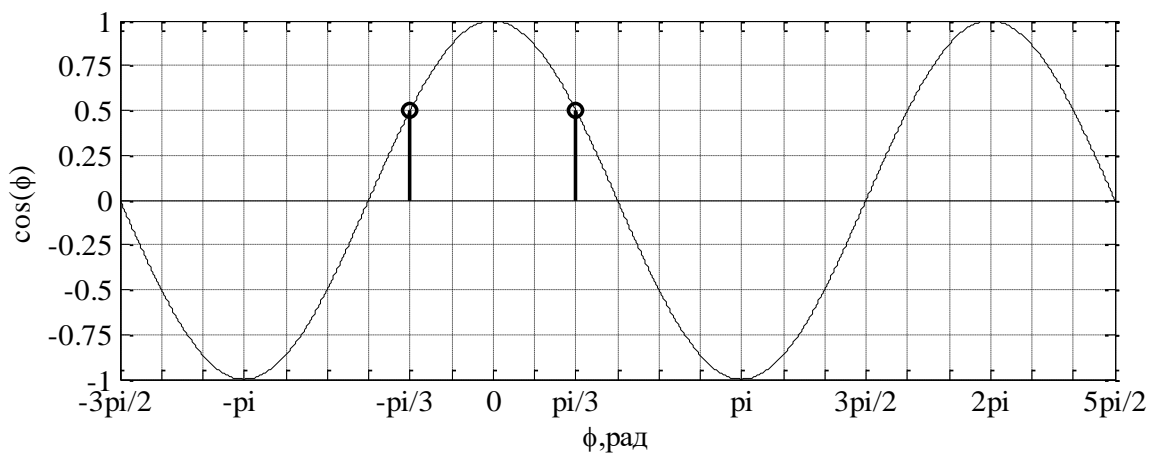


Рис. 3.2. Графік, що ілюструє неоднозначність функції косинус для різних за знаком аргументів

У дослідженнях для обчислення функції арккосинус використано вбудовану MATLAB-функцію `acos(*)`, яка повертає значення лише в межах інтервалу заданого у (3.8). На рис. 3.3 наведено результати її використання для визначення фази косинусоїди в межах двох періодів.

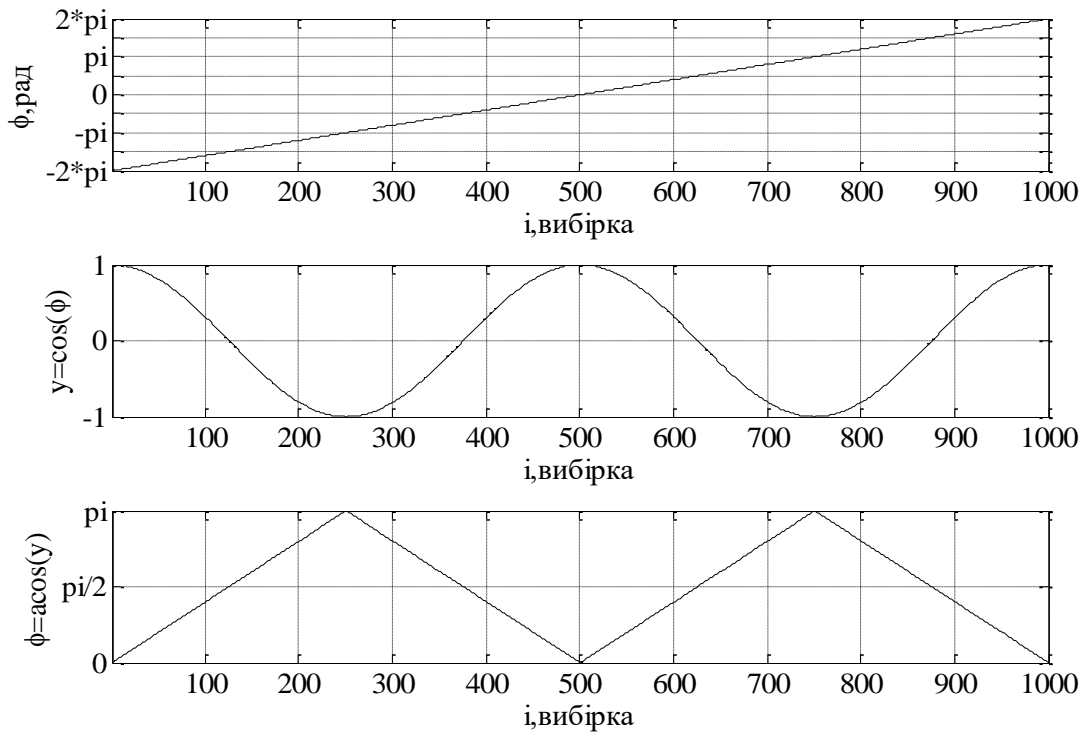


Рис. 3.3. Результати використання вбудованої функції `acos(*)`

Отже, за використання функції `acos(*)` іноді одержують некоректні результати навіть в межах одного періоду. Вирішити цю проблему можна аналізуючи знак похідної функції косинус. Враховуючи періодичність функції косинус аналіз проведено в межах центрального інтервалу, де  $\phi \in [-\pi; +\pi]$ . Як видно із рис. 3.3, при зростанні функції косинус (знак похідної додатній  $\frac{dy}{d\phi} > 0$ ) значення кутів є від'ємними, а при її спаданні (знак похідної від'ємний  $\frac{dy}{d\phi} < 0$ ) - додатними. Тобто існує однозначна залежність між знаком кута  $\phi$  і знаком похідної, а тому рівняння (3.7) можна записати у вигляді:

$$\phi = -\text{sign}\left(\frac{dy}{d\phi}\right) \cdot \arccos(y) + 2 \cdot \pi \cdot k, \quad k \in \mathbb{Z}; \quad (3.9)$$



де  $\text{sign}$  – функція визначення знаку;

$\frac{dy}{d\phi}$  – похідна функції косинус.

У цьому рівнянні знак мінус перед функцією  $\text{sign}(\ast)$  враховує той факт, що знак функції арккосинус є протилежним до знаку похідної функції косинус. Знак похідної визначаємо функцією  $\text{sign}(\ast)$  програмного пакету MATLAB. Ця функція дорівнює  $-1$  для всіх від'ємних значень і  $+1$  для додатних.

Для обчислення похідної сигналу використано вбудовану функцію  $\text{diff}(\ast)$  програмного пакету MATLAB. Ця функція визначає похідну чисельним методом, тобто похідна визначається як відношення приросту функції до приросту аргументу.

Наступним етапом після визначення арккосинуса в межах періоду є усунення розриву фази на краях періодів, тобто врахування періодичності функції. Для цього необхідно провести спеціальну процедуру – так зване розгортання фази (англ. – *phase unwrapping*).

Для розгортання фази потрібно виконати такі дії:

- визначення різниці фаз між двома сусідніми вибірками:

$$\Delta\phi(i) = \phi(i) - \phi(i - 1); \quad (3.10)$$

- порівняння різниці  $\Delta\phi$  із пороговим значенням, що, зазвичай, дорівнює  $\pi$ ;
- обчислення номера періоду, на основі інкрементації результату цілочисельного ділення різниці фаз на порогове значення:

$$k(i) = k(i - 1) + \text{int} \left[ \frac{\Delta\phi(i)}{\pi} \right]; \quad (3.11)$$

- коригування значення фази із урахуванням номера періоду:

$$\varphi(i) = \phi(i) + k(i) \cdot 2\pi. \quad (3.12)$$

Таким чином, якщо різниця між двома сусідніми значеннями перевищує  $\pm\pi$ , то значення доповнюється на  $\pm 2\pi$ . У дослідженнях для розгортання фази застосовано вбудовану функцію  $\text{unwrap}(\ast)$  із пакету MATLAB [61].

Результати роботи розробленого алгоритму із визначення фази на основі функції арккосинус із урахуванням знаку та періодичності наведено на рис. 3.4.

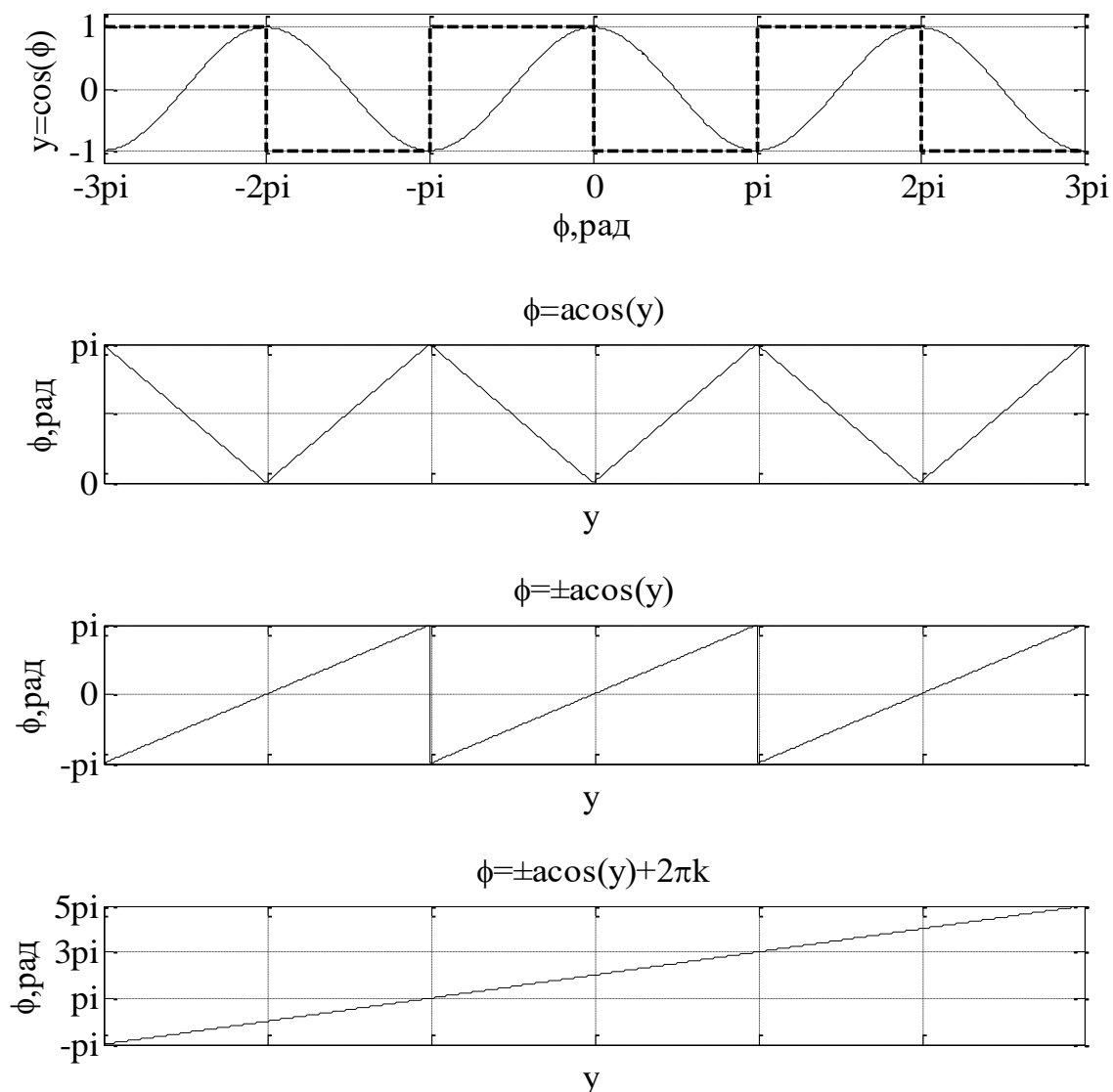


Рис. 3.4. Ілюстрація кроків алгоритму з визначення фази із функції арккосинус

Перевірку коректності розробленого алгоритму для визначення фази з функції арккосинус було здійснено на симульованих інтерферограмах (рис. 2.6). Для уникнення додаткових джерел похибок інтерферограму унормовано ідеальною огинаючою амплітуди.

На рис. 3.5 наведено результати верифікації алгоритму визначення повної фази сигналу інтерферограми за допомогою розробленого методу під час реконструкції відповідно лінійної і сферичної поверхонь. Як видно з наведених графіків, алгоритм забезпечує коректну реконструкцію лінійної рівної поверхні (рис. 3.5,а). У випадку сферичної поверхні (рис. 3.5,б) результат

реконструкції профілю поверхні не цілком коректний, оскільки у правій половині графіка профіль поверхні спадає (функція є парною відносно центру графіка), а у реконструйований профіль зростає (функція - непарна). Це пояснюється специфікою роботи функції `unwarp(*)`, яка завжди працює в режимі накопичення фази. Тому коректні результати реконструкції можна отримати тільки для поверхонь, профіль яких описується монотонно зростаючою функцією.

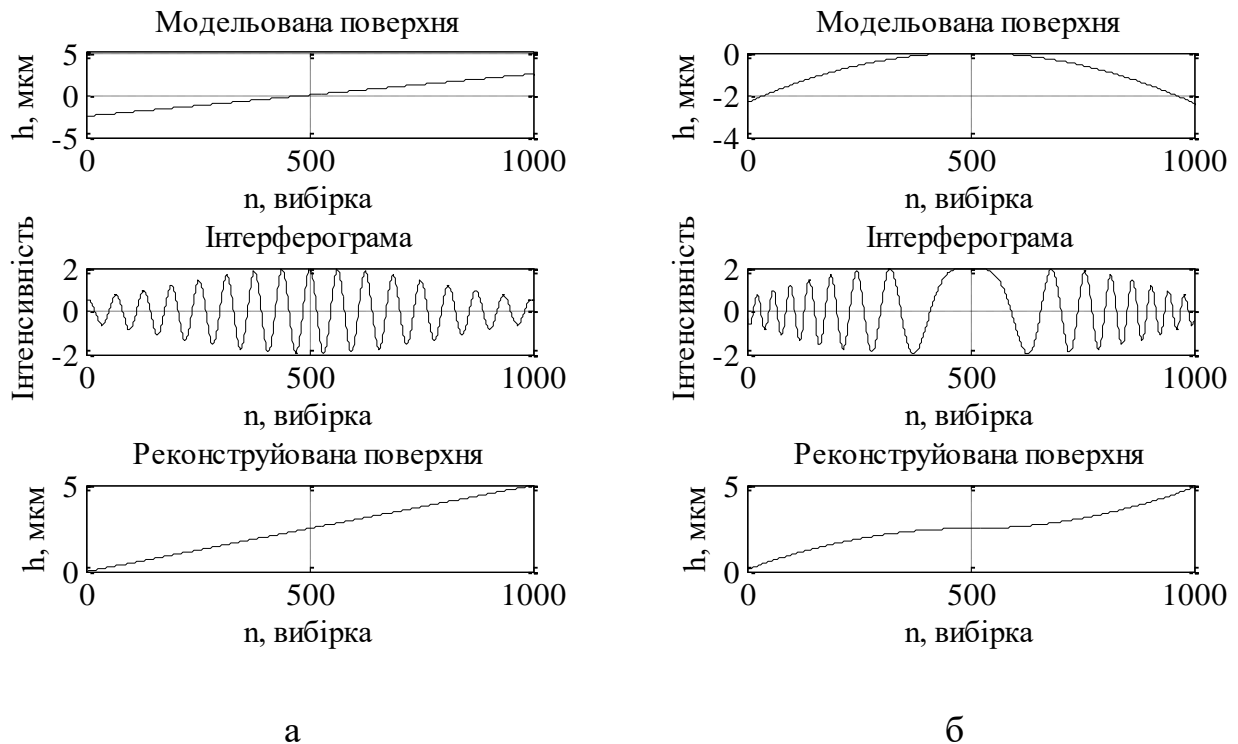


Рис. 3.5. Результати верифікації алгоритму з визначення фази:  
а – лінійна, б – сферична поверхня

За відсутності апріорних даних про характер поверхні (її монотонність) виникає серйозна проблема, пов'язана із визначенням знаку шуканої величини  $T$ . Як випливає з формул (2.4) і (2.5) функції несучої частоти і огинаючої амплітуди є парними, а тому інтерферограма матиме однаковий вигляд як для додатних, так і для від'ємних значень  $T$ , тобто втрачається інформація про знак.

Для вирішення цієї проблеми можна розглянути роботу в області, де шукана величина  $T$  не змінює знак. На практиці це означає, що досліджуваний об'єкт потрібно розмістити так, щоб не спостерігався інтерференційний максимум. Тобто в жодній точці поверхні шукана величина  $T$  не повинна дорівнювати нулю. Якщо у

реконструйованій поверхні відбувається перехід через нуль, то це означає що ми маємо неправильне визначення знаку фази і його необхідно проінвертувати.

Якщо є інформація про те, що поверхня симетрична (як у випадку поверхні мембрани сенсора тиску), то врахувати проблему знаку можна за таким правилом: всі значення фази після точки симетрії інтерферограми (максимальне значення огинаючої амплітуди) необхідно проінвертувати. Результати використання цього правила представлено на рис. 3.6.

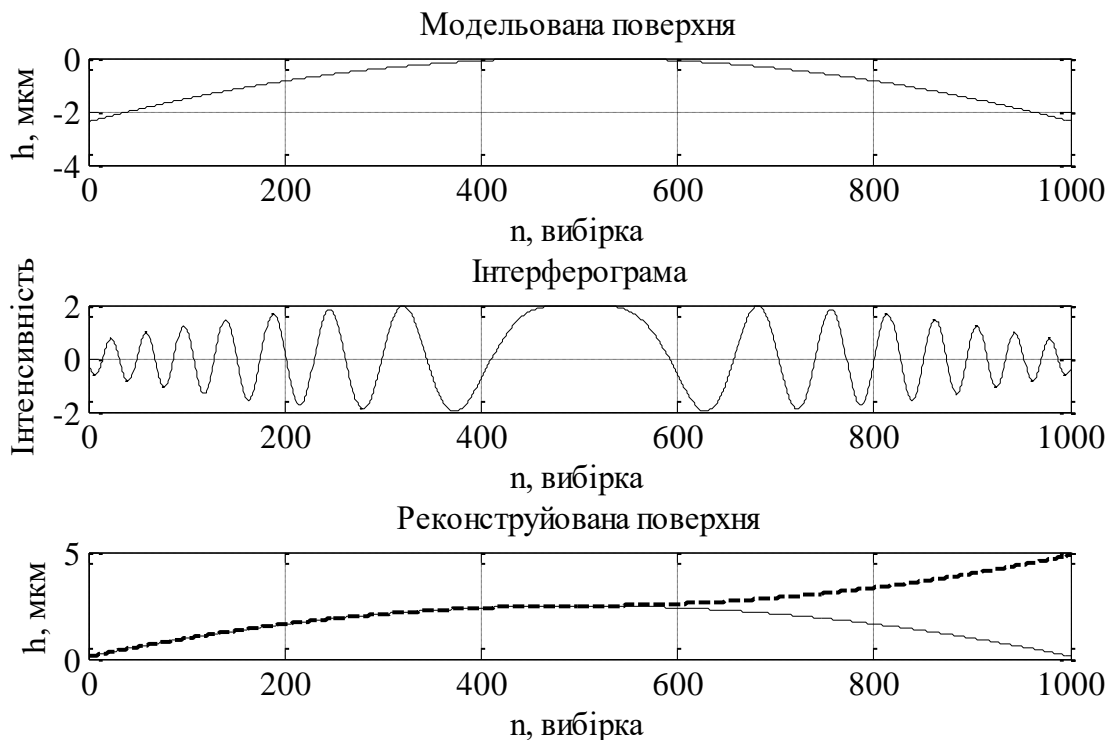


Рис. 3.6. Використання правила коригування знаку фази для симетричного профілю поверхні

Крім того, видно що між оригінальною та реконструйованою поверхнею є систематичне зміщення. У випадку оригінальної поверхні система координат по осі  $y$  має абсолютний характер оскільки нульовий пункт ( $T=0$ ) відповідає такому положенню поверхні, де різниця оптичного ходу променів дорівнює нулеві. Для реконструйованої поверхні система координат має відносний характер оскільки функція арккосинус завжди повертає значення в межах першого періоду  $[-\pi; +\pi]$  без врахування члену  $2\pi \times k$ , тобто інформація про абсолютне значення періоду

втрачається. Оскільки розгортання фази за допомогою функції  $\text{unwrap}()$  відбувається зліва направо, то крайні ліві точки завжди належать до першого періоду, що видно на графіках. Це не принципово, оскільки для визначення профілю поверхні важливим є відносне, а не абсолютне положення точок поверхні. Проте цей аспект можна врахувати аналізуючи функцію огинаючої амплітуди. Точка, де огинаюча амплітуди сягає максимуму (точка симетрії інтерферограми), збігається з істинним початком координат (оптична різниця ходу дорівнює нулеві), а значення реконструйованої поверхні у цій точці по суті і є сталим зміщенням. Для усунення систематичного зсуву необхідно відняти від кожної точки реконструйованої поверхні значення в точці, де огинаюча амплітуди максимальна:

$$h_{corrected}(x, y) = h_{rec}(x, y) - h_{rec}(x_{I_{env,max}}, y_{I_{env,max}}) \quad (3.13)$$

Результати усунення сталого зміщення наведено на рис. 3.7.

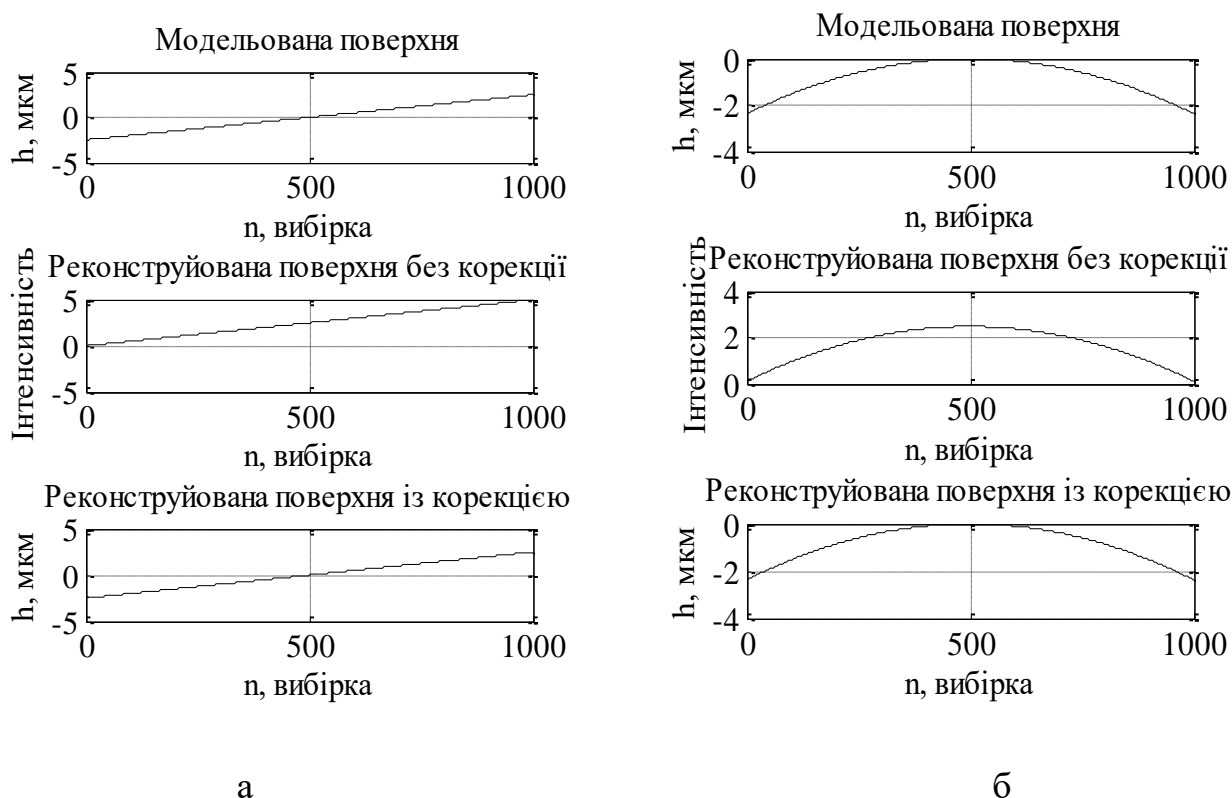


Рис. 3.7. Реконструйована поверхня без сталого зміщення:

а – лінійна; б – сферична поверхня

На рис. 3.8 представлено похибки реконструкції профілю лінійної і сферичної поверхонь за використання методу із нормуванням інтерферограми ідеальною

огиноючою амплітуди. Ця похибка виникає через неточне визначення чисельним методом похідної унормованої несучої частоти.

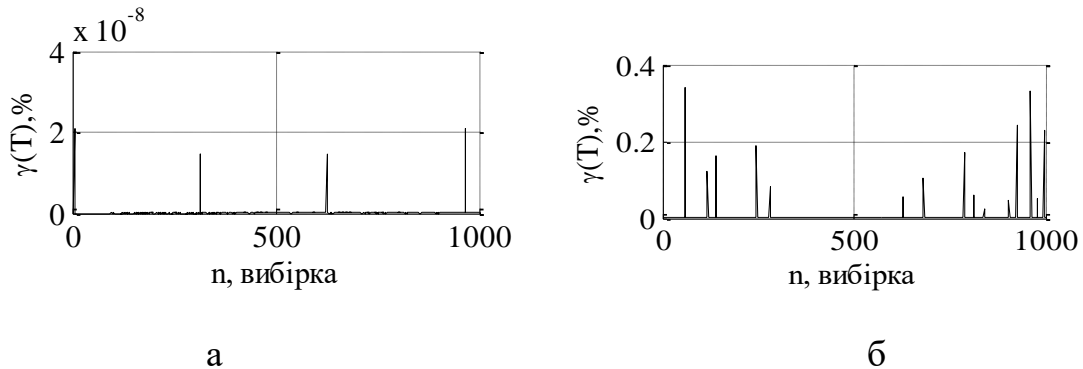


Рис. 3.8. Похибка реконструкції профілю із нормуванням несучої частоти ідеальною огиноючою амплітуди: а – лінійна, б – сферична поверхня

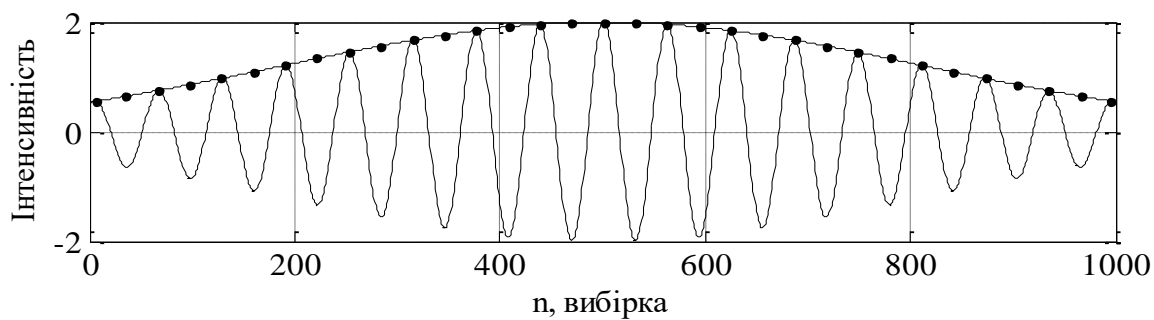
### 3.1.2. Оцінювання огиноючої амплітуди сигналу інтенсивності інтерферограми методом інтерполяції

Суть цього підходу полягає у визначенні координат екстремальних значень сигналу інтенсивності інтерферограми, що збігаються із точками огиноючої амплітуди (рис. 3.9) та застосуванні методу інтерполяції для знаходження оцінки огиноючої амплітуди [62].

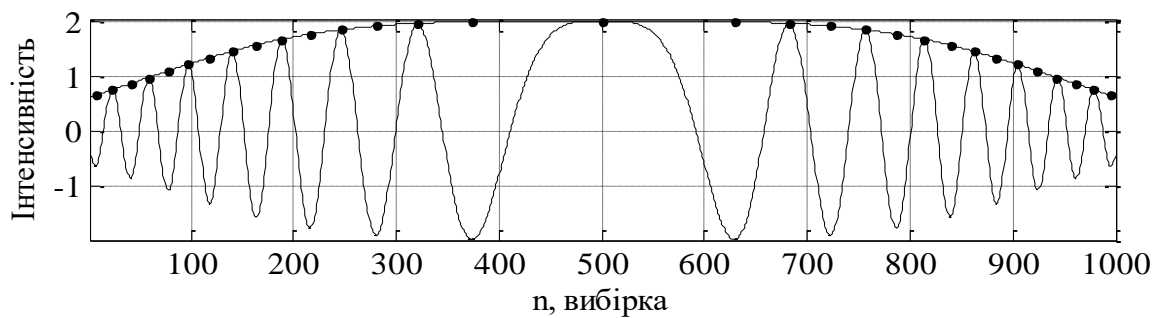
Знаходження точок екстремумів сигналу інтенсивності інтерферограми із вилученою сталою складовою можна звести до пошуку максимумів модуля цієї знакозмінної функції (точки на огиноючій амплітуди сигналу інтенсивності інтерферограми на рис. 3.9). Як відомо, максимумами функції визначаються координатами точок, де її похідна змінює знак із додатного на від'ємний. Наприклад, у пакеті MATLAB [61] для обчислення похідної сигналу, поданого вибітками миттєвих значень, можна використати вбудовану функцію `diff(*)`:

$$\text{diff}(y) = \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \approx \left( \frac{dy}{dx} \right) \quad (3.14)$$

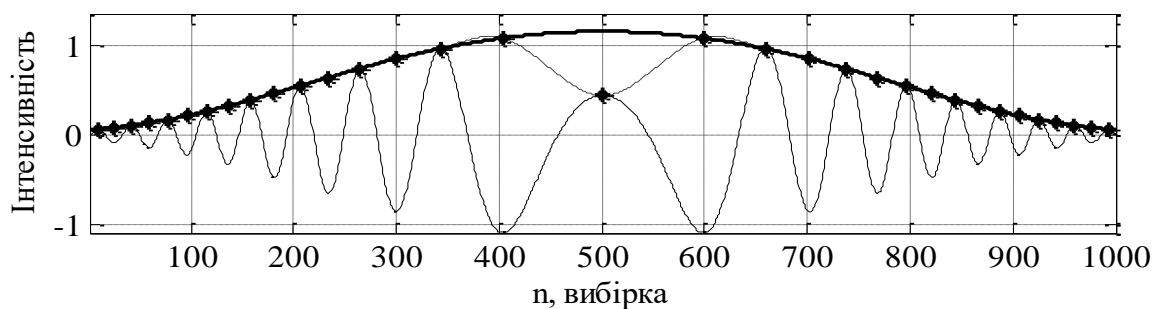
У дослідженнях застосовано сплайн-інтерполяцію поліномом 3-го порядку, яка також може бути реалізована за допомогою вбудованої функції MATLAB - `interp1(*)`. Результати використання цього методу для оцінки огиноючої амплітуди сигналів інтерферограми наведено на рис. 3.9.



а



б



в

Рис. 3.9. Результати методу інтерполяції для визначення огибаючої амплітуди сигналу інтерферограми: а – лінійна поверхня, б – сферична центральний рядок, в – сферична віддалений від центру рядок

Як видно із рисунку, використання даного методу дає задовільні результати для інтерферограми лінійної поверхні (рис. 3.9,а) та для 500-го рядка сферичної, де наявний максимум у центрі інтерферограми (рис. 3.9,б). За відсутності максимуму у центрі інтерферограми (рис. 3.9,в) інтерпольована огибаюча амплітуди (пунктирна лінія) значно відхиляється від ідеальної в центрі інтерферограми.

Для вирішення цієї проблеми необхідно визначити центральні максимуми для всіх рядків, шляхом додаткової інтерполяції через центральний стовпчик

інтерферограми (по вертикальній осі  $y$ ). Отримані значення будуть використані для інтерполяції по рядках. Результати представлено на рис. 3.10.

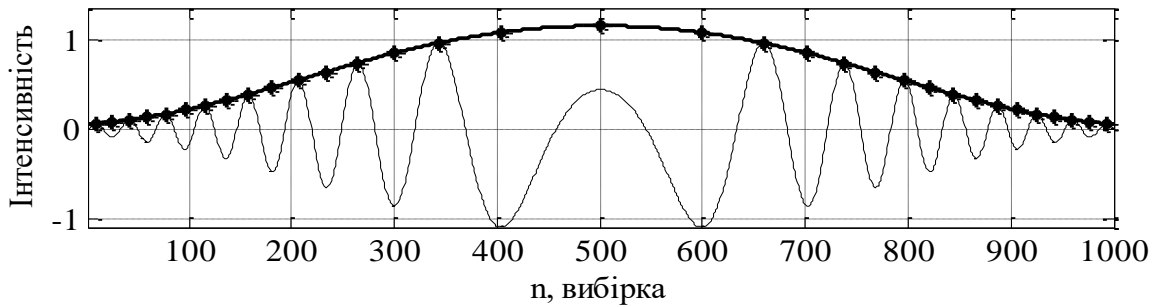


Рис. 3.10. Результати використання методу інтерполяції для віддаленого від центру рядка після визначення центрального максимуму

Для кількісного оцінювання розбіжності ідеальної огинаючої амплітуди та її оцінки за методом інтерполяції обчислено середньоквадратичні зведені похибки за формулою:

$$\sigma_{env} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [\tilde{E}_i(T) - E_i(T)]^2}}{N \cdot \max[E(T)]} \cdot 100\% , \quad (3.15)$$

де  $E_i$  і  $\tilde{E}_i$  – відповідно значення функції огинаючої амплітуди і її оцінки для  $i$ -тої вибірки сигналу;

$N$  – кількість вибірок у сигналі.

Для лінійної поверхні значення похибки визначення огинаючої амплітуди методом інтерполяції становить 0,024 %, а для сферичної – 0,09 % та 0,1 % для 500 -го та 50-го рядків відповідно. Джерелом похибок цього способу є неточність чисельних методів визначення похідної та інтерполяції.

Таким чином, точність оцінки огинаючої амплітуди цілком задовольняє потреби інтерферометрії, тому результати будуть використані для нормалізації несучої частоти інтерферограми.

### 3.1.3. Унормування несучої частоти сигналу інтенсивності

Для одержання нормалізованого сигналу (без амплітудної модуляції) необхідно поділити сигнал інтерферограми на оцінку його огинаючої амплітуди



згідно виразу (3.1). Вигляд унормованого сигналу інтерферограми за використання ідеальної огинаючої амплітуди для різних поверхонь зображено на рис. 3.11.

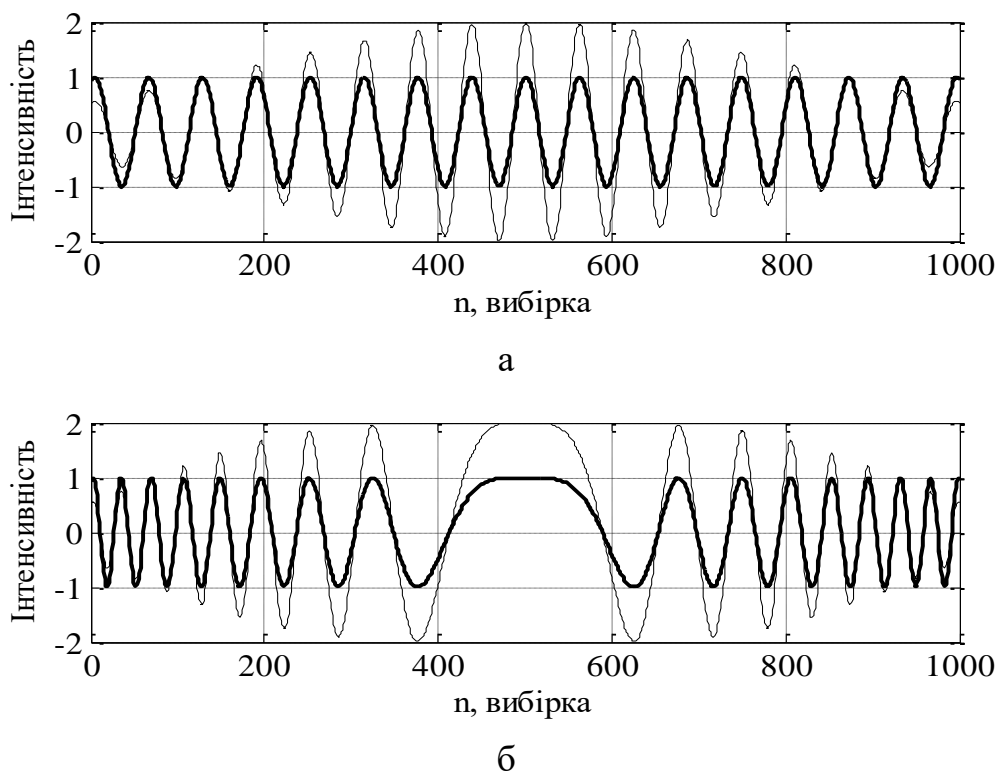


Рис. 3.11. Унормований сигнал (потовщена лінія) інтенсивності інтерферограми за допомогою огинаючої амплітуди: а – лінійна; б – сферична поверхня

Проте за використання для нормалізації не ідеальної огинаючої амплітуди, а її наближеної оцінки, значення унормованого сигналу інтенсивності інтерферограми, можуть перевищити діапазон  $+1...-1$ . Це зумовлює проблему обчислення фази сигналу із функції арккосинус за формулою (3.5), оскільки ця функція визначена лише для аргументів у границях  $+1...-1$ . У роботі проаналізовано три способи вирішення цієї проблеми.

Суть першого способу базується на заміні всіх значень унормованого сигналу, що виходять за межі діапазону  $+1...-1$  такими граничними значеннями:

- всім значенням сигналу, які перевищують 1 присвоюється значення 1;
- всім значенням сигналу, які менші за -1 присвоюється значення -1.

Другий спосіб полягає у додатковому масштабуванні унормованого сигналу інтенсивності інтерферограми шляхом:

- визначення максимального значення унормованого сигналу для кожного рядка інтерферограми;
- перемасштабування кожного рядка інтерферограми діленням на визначене максимальне значення.

У третьому способі застосовано локальне масштабування, тобто коригування лише тих фрагментів сигналу інтенсивності інтерферограми, значення яких навіть після унормування огинаючою амплітуди за модулем більші 1.

Для реалізації цього способу спочатку визначаються всі точки в межах півперіоду сигналу інтенсивності інтерферограми, що за модулем перевищують 1. Для корекції сигналу будуть розглянуті два випадки: для парної і не парної кількості точок масштабування. Якщо кількість точок не парна, то значення коригуються за формулою, що подана нижче:

$$I_j = \begin{cases} (k + I_{j-1})/2, & i \leq j < i + \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil \\ (k + I_{j+1})/2, & i + \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil \leq j < i + m \end{cases} \quad (3.16)$$

де  $I_j$  – скоригований нормалізований сигнал інтенсивності;

$k$  – відповідає +1 або -1;

$i$  – номер першого елемента, що більший за +1 (або менший за -1);

$m$  – кількість пунктів, що більші за +1 (або менші за -1).

У випадку парної кількості точок, скориговані значення обчислюються за такою формулою:

$$I_j = (k + I_{j-1})/2, \quad i \leq j < i + m \quad (3.17)$$

Пояснення позначень у наведеному виразі такі ж як і у виразі (3.16).

Слід зауважити, що для точок, що менші за  $i + [m/2]$  обчислення проводиться у бік збільшення  $j$ , а в випадку точок, більших за  $i + [m/2]$  обчислення здійснюється в іншому напрямку (зменшення значення  $j$ ).

За використання цього способу також виникає проблема на межах унормованого сигналу інтенсивності інтерферограми, тому що для граничних

точок не існує попередньої (або наступної) точки. У цьому випадку перша (або остання) точка буде встановлена в 1 (або -1). Для всіх інших точок значення обчислюються за формулами (3.16) або (3.17).

Для вибору найкращого способу обчислено зведені похибки кожного нормалізації сигналу інтенсивності інтерферограми. Результати є такими:

- спосіб 1: 0,01;
- спосіб 2: 0,08;
- спосіб 3: 0,009.

Із наведеного можна зробити висновок, що за допомогою способу 3 можна досягти найкращих результатів унормування. Тому у подальшому використано саме його.

#### **3.1.4. Реконструкція профілю поверхні із сигналу інтенсивності інтерферограми, унормованого інтерпольованою огибаючою амплітуди**

Із унормованого сигналу інтенсивності інтерферограми можна визначити поточну фазу несучої частоти

$$\Phi_n = \arccos[I_{norm}(n)], \quad (3.18)$$

а далі шляхом її розгортання і масштабування знайти шуканий інформативний параметр - оптичну різницю ходу  $T$ :

$$T_n = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \pi} \cdot \text{unwrap}(\Phi_n). \quad (3.19)$$

Підсумовуючи наведене у пп. 3.1.1-3.1.3 та враховуючи формули (3.19) і (3.20), на рис. 3.12 наведено послідовність обчислень, які дають можливість на основі одного рядка сигналу інтерферограми реконструювати профіль поверхні.

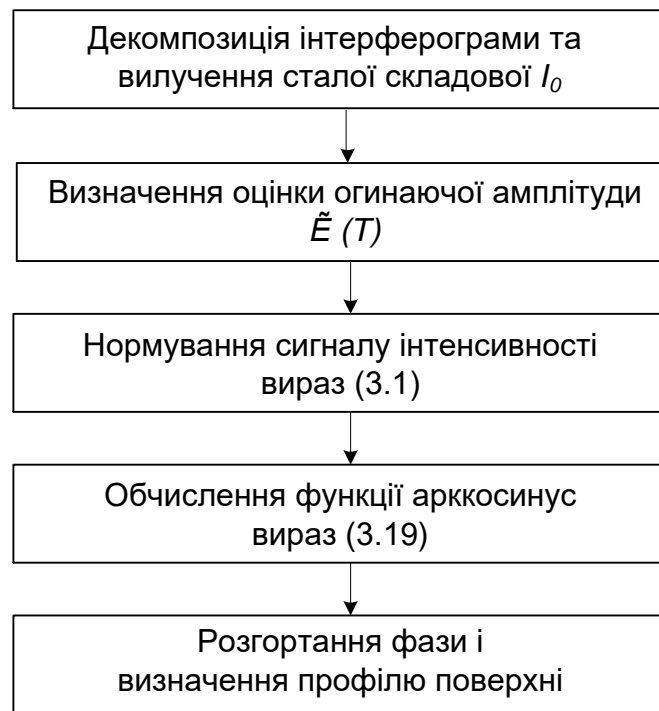


Рис. 3.12. Послідовність обчислень для реконструкції профілю поверхні за методом нормування сигналу інтерпольованою оцінкою огинаючої

Для оцінювання обчислювальної ефективності цього методу за поданою у п. 2.5 методикою потрібно підрахувати кількість операцій додавань і множень на етапах:

- визначення коефіцієнтів кубічного сплайну  $O(interp)$ , який інтерполює огинаючу амплітуди сигналу інтерферограми;
- нормування сигналу інтерферограми, що рівносильне діленню кожного пікселя на відповідне значення огинаючої амплітуди  $O(1/x)$ ;
- обчислення фази несучої сигналу із функції арккосинус  $O(\arccos)$  та її розгортання  $O(unwrap)$ .

Число операцій додавання і множення при обчисленні кубічної сплай-інтерполяції огинаючої амплітуди сигналу інтерферограми можна обчислити за виразом [59].

$$O(interp) = 3(p-1)N, \quad (3.20)$$

де  $p$  – степінь поліному ( $p=3$ );

$N$  – число пікселів у одному рядку інтерферограми.

Для методу, в основі якого лежить інтерполяція, кількість обчислень на практиці буде дещо, більша оскільки не враховано операції розрахунку коефіцієнтів поліному. Разом з тим кількість операцій множення буде порівняно не велика, оскільки стосується лише точок екстремумів, а їх кількість складає кілька відсотків від кількості пікселів у рядку інтерферометричної картини.

Обчислення функції розгортання фази  $O(unwrap)$  пов'язане із додаванням до поточного значення функції арккосинус константи  $2\pi m$  (де  $m=0,1,2\dots$  – номер періоду сигналу несучої інтерферограми). Подібні обчислення виконуються ефективно в сучасних обчислювальних пристроях, тому істотно не впливають на обчислювальну ефективність.

Таким чином, кількість додавань і множень необхідних для реконструкції профілю поверхні із одного рядка інтерферограми за використання методу на основі демодуляції несучої частоти, унормованої шляхом інтерполяції

$$\begin{aligned} O(HI) &= O(interp) + N \cdot O\left(\frac{1}{x}\right) + N \cdot O(\arccos) = \dots \\ &= 3N \cdot (p-1) + 3Ni + N(3k-1) \approx 3N \cdot (p+i+k-1), \end{aligned} \quad (3.21)$$

де  $i$  та  $k$  – відповідно кількість кроків ітерацій під час виконання ділення та кількість членів у ряді Тейлора.

На підставі наведених у п.2.5 допущень, прийнято  $i = 5$  та  $k = 5$ , а степінь кубічного сплайну  $p=3$ , тому кількість операцій додавань і множень для реконструкції профілю поверхні із одного рядка інтерферограми за розглянутим методом складає

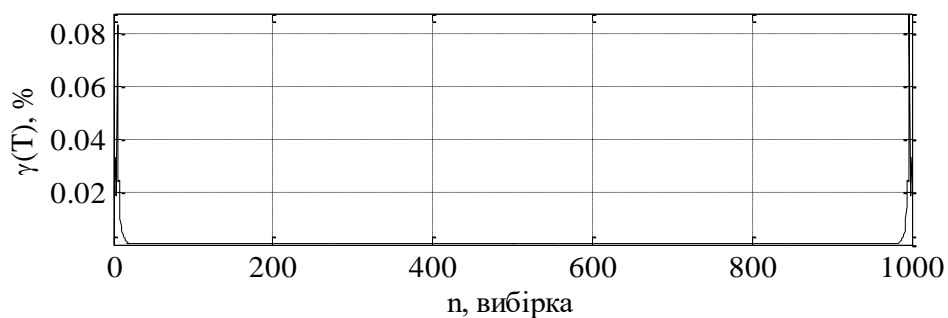
$$O(HI) = 36 \cdot N \quad (3.22)$$

Отже, кількість додавань і множень, які має виконати спецпроцесор для реконструкції за даним методом профілю поверхні із одного рядка інтерферограми із  $N=1024$  пікселів складає

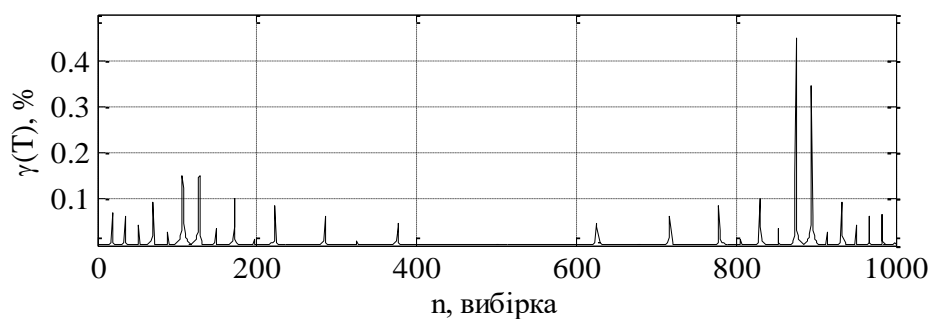
$$O(HI) = 36864.$$

Метод придатний до розпаралелення лише по рядках інтерферограми, оскільки потрібно виконати інтерполяцію огинаючої амплітуди.

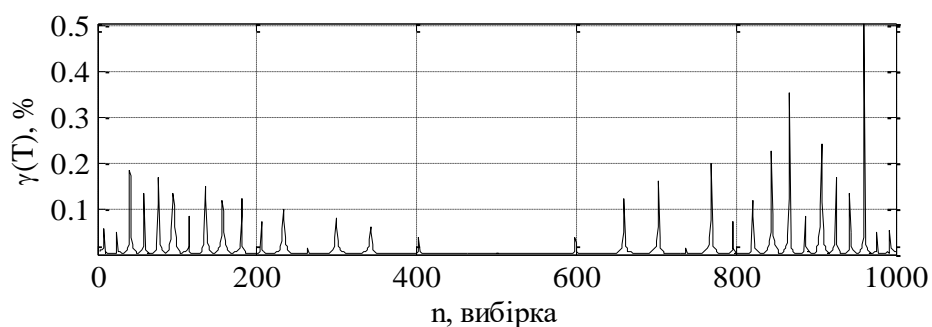
На рис. 3.13 наведено графіки похибок реконструкції профілю лінійної та сферичної нелінійної поверхонь за методом нормалізації інтерферограми оцінкою огинаючої амплітуди у просторовій області.



а



б



в

Рис. 3.13. Похибки реконструкції профілю: а - лінійної поверхні; б – сферичної, центрального рядка; в – сферичної, віддаленого від центру рядка

Як видно з графіка, у випадку лінійної поверхні, похибки реконструкції спостерігаються на краях інтерферограми, а максимальна зведена похибка не перевищує 0,09 %. Значення середньоквадратичної зведеної похибки становить 0,005 %. У випадку сферичної поверхні зведена похибка реконструкції не перевищує 0,4 % для 500-го та 0,5 % для 50-го рядків. Середньоквадратична зведена похибка становить 0,024 % для 500-го рядка та 0,03 % для 50-го рядків.

### 3.2. Метод посегментної апроксимації

Інтерферометрична картина утворюється як масив пікселів різної інтенсивності, тобто кожний рядок інтерферограми можна розглядати як дискретний сигнал  $I(n)$ . Залежність сигналу інтерферограми від номера вибірки суттєво відрізняється для лінійної та сферичної поверхонь (див. рис. 2.8).

Оскільки залежність між інтенсивністю сигналу  $I$  та оптичною різницею ходу  $T$  описується рівнянням (1.6), то, насправді, вигляд  $I(T)$  буде однаковим незалежно від форми досліджуваної поверхні. Цей аспект покладено в основу розробленого методу посегментної апроксимації [63].

Як зазначено вище, сигнал інтерферограми, як функція оптичної різниці ходу, інваріантний до профілю досліджуваної поверхні. Тому форма сигналу інтерферограми, одержана на лінійній поверхні може бути перенесена на сферичну і навпаки, за умови близьких значень оптичної різниці ходу.

Якщо апроксимувати сегмент інтерферограми поліномом:

$$\tilde{I} = \sum_{m=0}^M \alpha^m \cdot T^m, \quad (3.23)$$

то реконструкція профілю поверхні вимагатиме пошуку коренів поліному, що є складною в обчислювальному сенсі задачею.

Натомість завдання реконструкції істотно спрощується за застосування оберненої до  $I(T)$  функції (рис. 3.14). Знаходження інформативного параметра  $T$  вимагає обчислення значення апроксимуючої функції:

$$\tilde{T} = \sum_{k=0}^K \alpha^k \cdot I^k, \quad (3.24)$$

Такий підхід дає можливість проапроксимувати фрагмент профілю на взірцевій поверхні (параметри якої відомі) і в подальшому застосовувати результати апроксимації для будь-якої іншої. На практиці це виглядає як калібрування вимірювального каналу інтерферометра, тому параметри джерела світла мають бути ідентичними на етапі калібрування та вимірювання.

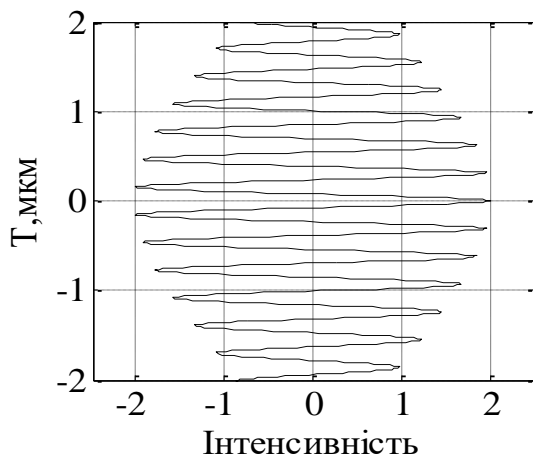


Рис. 3.14. Графік функції інформативного параметра  $T$  від інтенсивності пікселя інтерферограми  $I$

Наведена на рис. 3.14 функція  $T(I)$  є багатозначною (multivalued function) із змінною областю значень аргументу  $T$  на різних сегментах. Ці обставини ускладнюють завдання поліноміальної апроксимації функції  $T(I)$ . Тому апроксимацію потрібно здійснити для кожного сегменту функції  $T(I)$ . Сегмент – це відтинки функції у межах зміни значень аргументу  $I$ . Сегментацію функції  $T(I)$  зручно звести до пошуку локальних екстремумів її оберненої версії, тобто зареєстрованого сигналу інтерферограми (рис. 3.15).

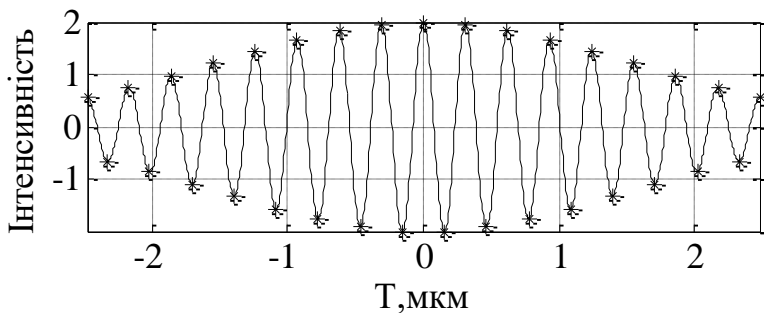


Рис. 3.15. Сегментація сигналу інтерферограми

На кожному сегменті оптична різниця ходу апроксимується окремо поліномом:

$$\tilde{T} = a_0 + a_1 \cdot I_C + a_2 \cdot I_C^2 + \dots + a_K \cdot I_C^K, \quad (3.25)$$

де  $I_C$  – сигнал інтерферограми на етапі калібрування;

$a_0 \dots a_K$  – коефіцієнти поліному.



Коефіцієнти поліному визначаються із умови мінімуму середньоквадратичної похибки апроксимації:

$$\varepsilon_A^2 = \min \sum_{n=1}^N (T_n - \tilde{T}_n)^2, \quad (3.26)$$

де  $n$  – номер вибірки сигналу.

Спираючись на інваріантність сигналу інтерферограми щодо оптичної різниці ходу, можна апроксимувати профіль досліджуваної поверхні поліномом із коефіцієнтами, значення яких визначено під час калібрування:

$$T = a_0 + a_1 \cdot I + a_2 \cdot I^2 + \dots + a_K \cdot I^K, \quad (3.27)$$

де  $I$  – сигнал інтерферограми досліджуваної поверхні;

$a_0 \dots a_K$  – коефіцієнти поліному, отримані на етапі калібрування.

Значення коефіцієнтів апроксимуючого поліному залежить від розмаху сигналу інтерферограми. Як підтвердження, у таблиці 3.1 подано коефіцієнти поліному 3-го порядку для сегментів 1, 2, 15 і 16 під час калібрування на лінійній поверхні (рис. 2.6).

Таблиця 3.1

**Значення коефіцієнтів апроксимаційних поліномів на різних сегментах**

сегмент	$a_0$ , мкм	$a_1$ , мкм/кд	$a_2$ , мкм/кд <sup>2</sup>	$a_3$ , мкм/кд <sup>3</sup>
1	-2,4	-0,17	-0,2	-1,75
2	-2,25	0,13	-0,11	0.81
15	-0,23	-0,02	$-3,96 \cdot 10^{-4}$	-0,004
16	-0,08	0,02	$-1,28 \cdot 10^{-4}$	0,0038

Ця обставина вимушує здійснювати підбір найближчого за розмахом сегменту із набору калібрувальних сегментів. Критерієм підбору є покриття аналізованого сегменту калібрувальним. Найпростішим алгоритмом відбору є зіставлення екстремальних значень аналізованого сегменту із набором калібрувальних значень у напрямку зростання їх розмаху.

Таким чином, метод реконструкції поверхні за методом посегментної апроксимації складається з двох етапів: калібрування та, власне, реконструкції.

Під час калібрування вимірювального каналу інтерферометра реєструється інтерферограма одержана для поверхні із відомими параметрами. Далі здійснюється сегментація отриманої інтерферограми та визначення поліноміальних (апроксимаційних) коефіцієнтів для кожного сегменту за формулою (3.25).

Таким чином, реконструкція профілю поверхні за методом по сегментної апроксимації сигналу інтенсивності передбачає виконання низки обчислювальних дій, що представлені на рис. 3.16.

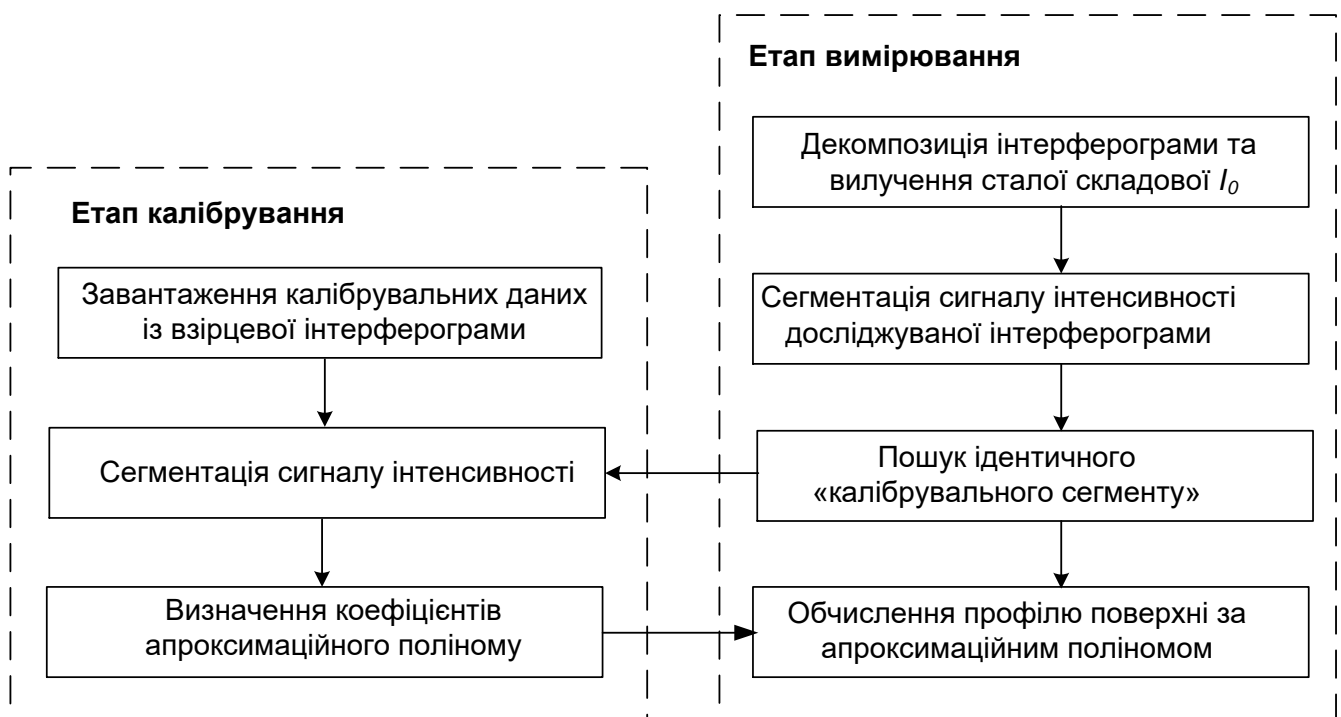


Рис. 3.16. Послідовність обчислень для реконструкції профілю поверхні із сигналу інтенсивності за методом посегментної апроксимації

Оскільки калібрування виконується один раз перед початком вимірювань, для оцінювання обчислювальної ефективності цього методу береться до уваги кількість додавань і множень, яка має місце на етапі вимірювань.

Реконструкція поверхні за методом посегментної апроксимації вимагає піднесення чисел (значень інтенсивності пікселів) до степеня та перемноження на відповідні коефіцієнти апроксимаційного полінома, а також додавання одержаних добутків. При цьому кількість операцій додавань і множень залежатиме від порядку  $p$  апроксимаційного полінома і визначатиметься таким чином:

$$O(\text{approx}) = 3(p-1)N ; \quad (3.28)$$

Для апроксимаційного поліному 3-го порядку  $p = 3$ , тому кількість додавань і множень, необхідних для реконструкції профілю поверхні із одного рядка інтерферограми за використання методу посегментної апроксимації становить

$$O(\text{ПА}) = O(\text{approx}) = 6N \quad (3.29)$$

Отже, кількість додавань і множень, які має виконати спецпроцесор для реконструкції за даним методом профілю поверхні із одного рядка інтерферограми із  $N=1024$  пікселів складає

$$O(\text{ПА}) = 6144.$$

Метод придатний до розпаралелення по точках.

У додатку Б.1 наведено код програми у пакеті MatLab із імплементацією методу посегментної апроксимації із метою дослідження його ефективності для реконструкції профілю синтезованих лінійної та сферичної поверхонь.

На рис. 3.17 представлена зведена похибка реконструкції профілю лінійної поверхні.

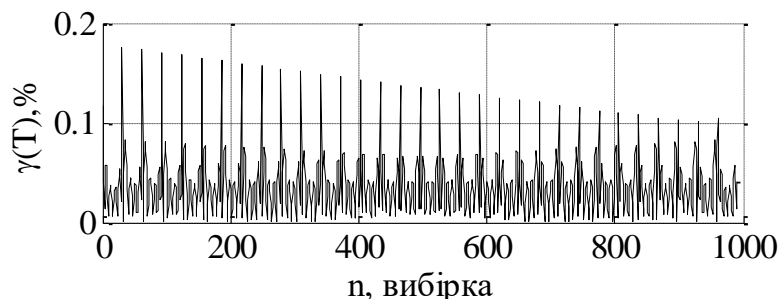


Рис. 3.17. Зведена похибка реконструкції профілю лінійної поверхні

Як видно з рисунку, максимальна похибка реконструкції не перевищує 0,18 %. Графік похибки має періодичний характер із яскраво вираженими піками (spur). Максимальні похибки спостерігаються на границях сегментів, що зумовлено відхиленням апроксимуючого поліному від реальної інтерферограми. Середньоквадратична зведена похибка становить 0,05 %.

На рис. 3.18 зображено зведені похибки реконструкції профілю сферичної поверхні для центрального 500-го та віддаленого від центру 50-го рядків.

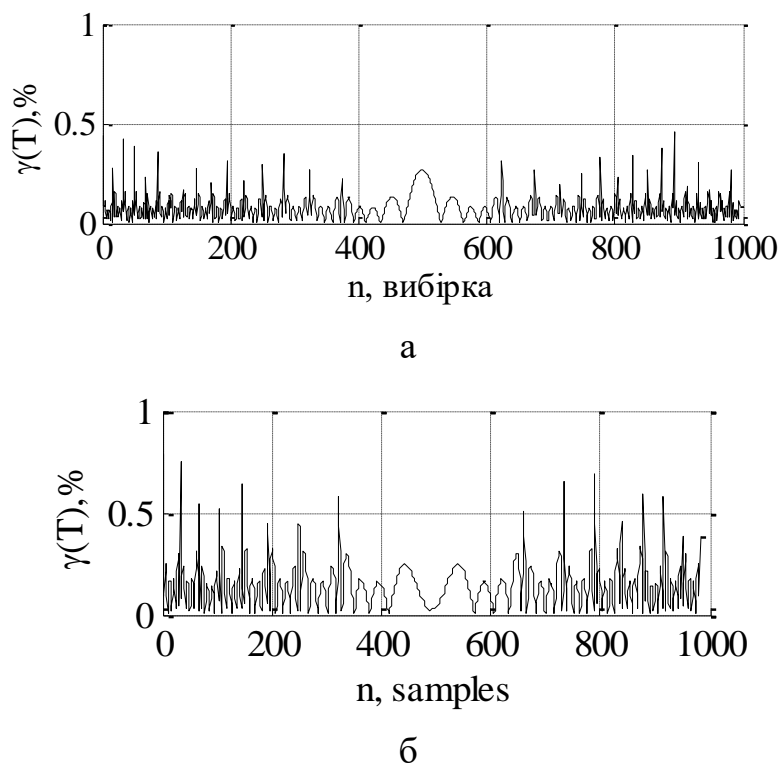


Рис. 3.18. Зведена похибка реконструкції профілю сферичної поверхні для 500 (а) та 50 (б) рядків

Характер похибок для сферичної поверхні не є періодичним, оскільки тривалість сегментів інтерферограми сферичної поверхні збільшується у міру наближення до центру. Середньоквадратична зведена похибка приблизно однакова для всіх рядків зображення і не перевищує 0,2 %, а максимальні значення зведеної похибки не перевищують 0,5 % для 500 та 0,8 % для 50 рядків.

Оскільки джерелом похибок є розбіжність між реальною інтерферограмою та апроксимуючим поліномом, особливо на границях сегментів, досліджувалося можливість покращення точності реконструкції шляхом збільшення порядку апроксимаційного поліному.

Зі збільшенням порядку поліному характер похибок істотно не змінюється, тому подано лише числові значення похибок для лінійної та сферичної поверхонь за використання апроксимаційних поліномів 3, 5 та 15 порядків. У таблиці 3.2 представлено максимальні зведені похибки реконструкції, а у таблиці 3.3 – їх середньоквадратичні значення.

Таблиця 3.2

**Залежність максимальних похибок реконструкції від порядку поліному**

Порядок поліному	$\gamma(T)$ , % лінійна поверхня	$\gamma(T)$ , % сферична 500 рядок	$\gamma(T)$ , % сферична 50 рядок
3	0,2	0,5	0,8
5	0,12	0,5	0,6
15	0,06	0,28	0,3

Таблиця 3.3

**Залежність середньоквадратичних зведених похибок реконструкції від порядку поліному**

Порядок поліному	$\sigma$ , % лінійна поверхня	$\sigma$ , % сферична 500 рядок	$\sigma$ , % сферична 50 рядок
3	0,05	0,2	0,18
5	0,03	0,12	0,11
15	0,01	0,03	0,04

Результати досліджень показали, що збільшення порядку апроксимаційного поліному майже вдвічі та у п'ять разів не дає адекватного підвищення точності реконструкції, тому рекомендовано обмежитися застосуванням поліному 3 порядку.

Метод посегментної апроксимації виявив інваріантність до кривизни поверхні, забезпечує стабільність при реконструкції для віддалених від центру сегментів інтерферограми, тому його доцільно застосовувати для складних нелінійних поверхонь. Крім того, цей метод володіє високою обчислювальною ефективністю – для відтворення одного пікселя поверхні потрібно виконати лише 6 додавань і множень.

### 3.3. Метод реконструкції профілю поверхні на основі моделі Проні

#### 3.3.1. Модель Проні та її застосування для розкладу сигналу на комплексні експоненти

Метод Проні у загальному випадку передбачає розклад сигналу на комплексні згасаючі експоненти. У випадку дійсних дискретних відліків, сигнал апроксимується згасаючими косинусоїдами [64].

Незважаючи на те, що метод Проні був розроблений ще наприкінці 18-го століття, на цей час до нього спостерігається значна зацікавленість, що зумовлено розвитком обчислювальних засобів та появі низки його варіацій [65,66]. Метод є потужним інструментом для моделювання вибірки експериментальних даних  $s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  за допомогою суми  $p$  комплексних експонент:

$$\hat{s}_n = \sum_{k=1}^p a_k \cdot e^{(\sigma_k + j2\pi f_k) \cdot n \cdot \Delta + j\theta_k} = \sum_{k=1}^p h_k \cdot z_k^n. \quad (3.30)$$

де:  $\tilde{s}_n$  – оцінка сигналу;

$a_k$  і  $\sigma_k$  – амплітуда та коефіцієнт загасання  $k$ -ї експоненти;

$f_k$  і  $\theta_k$  – частота і початкова фаза  $k$ -ї компоненти;

$n$  – номер вибірки;

$\Delta$  – період дискретизації інтерферограми.

У моделі Проні (3.30) для зручності аналізу і спрощення визначення параметрів  $a_k$ ,  $\sigma_k$ ,  $f_k$  та  $\theta_k$ , окремо виділено складові незалежні від часу

$$h_k = a_k \cdot e^{j\theta_k}. \quad (3.31)$$

та часозалежні компоненти

$$z_k = e^{(\sigma_k + j2\pi f_k) \cdot \Delta}. \quad (3.32)$$

Параметри моделі  $a_k$ ,  $\sigma_k$ ,  $f_k$  і  $\theta_k$  визначаються таким чином, щоб звести до мінімуму середньоквадратичну похибку різниці вибірок аналізованого сигналу  $s_n$  і його оцінки  $\tilde{s}_n$  (3.30):

$$\varepsilon^2 = \sum_{n=0}^{N-1} (s_n - \hat{s}_n)^2 = \sum_{n=0}^{N-1} \left( s_n - \sum_{k=1}^p h_k \cdot z_k^n \right)^2. \quad (3.33)$$

У оригінальному методі Проні для моделювання сигналів з реальними значеннями вибірок порядок  $p$  моделі дає змогу визначити параметри  $p/2$  комплексних експонент, згрупованих у спряжені пари. Це вимагає  $N = 2p$  вибірок.

Таким чином, рівняння (3.30) можна записати в матричній формі, ґрунтуючись на величинах (3.31) і (3.32):

$$\begin{pmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_p^1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{p-1} & z_2^{p-1} & \dots & z_p^{p-1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_p \end{pmatrix}. \quad (3.34)$$

З рівняння (3.34) потрібно визначити значення двох невідомих величин, тобто матрицю  $z$  і вектор  $h$ , а відтак і параметри моделі  $a, f, \sigma$  і  $\theta$ .

Один з методів визначення параметрів моделі Проні походить із теорії цифрової обробки сигналів і складається із таких етапів [65,67,68]:

1. Формування матриці Тепліца із вибірок модельованого сигналу:

$$\begin{pmatrix} s_p & s_{p-1} & \dots & s_1 \\ s_{p+1} & s_p & \dots & s_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ s_{2p-1} & s_{2p-2} & \dots & s_p \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{p+1} \\ s_{p+2} \\ \vdots \\ s_{2p} \end{pmatrix}. \quad (3.35)$$

2. Розв'язання матричного рівняння для визначення елементів вектору  $\{A_i\}$ , що є коефіцієнтами характеристичного рівняння:

$$P(z) = A_0 \cdot z^p + A_1 \cdot z^{p-1} + \dots + A_{p-1} \cdot z + A_p = \sum_{i=0}^p A_i \cdot z^{p-i}, \quad (3.36)$$

причому  $A_0 = 1$ .

3. Визначення невідомих комплексних коренів  $z_k$  із характеристичного рівняння (3.36):

$$P(z) = \prod_{k=1}^p (z - z_k) = (z - z_1) \cdot (z - z_2) \cdot \dots \cdot (z - z_p) = 0, \quad (3.37)$$

4. Обчислення із комплексних коренів часозалежних параметрів моделі (частоти  $f_k$ , загасання  $\sigma_k$ ):

$$f_k = \frac{1}{2\pi\Delta} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(z_k)}{\operatorname{Re}(z_k)}, \quad (3.38)$$

$$\sigma_k = \frac{\ln|z_k|}{\Delta}. \quad (3.39)$$

5. Формування матриці Вандермонда із коренів  $z_k$ :

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{pmatrix}. \quad (3.40)$$

6. Розв'язання матричного рівняння для визначення незалежних від часу параметрів моделі (амплітуди  $A_k$  і початкових фаз  $\theta_k$  косинусоїди):

$$a_k = |h_k|, \quad (3.41)$$

$$\theta_k = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(h_k)}{\operatorname{Re}(h_k)}. \quad (3.42)$$

На основі так визначених параметрів, сигнал інтерферограми може бути замінений його оцінкою. Проте для реконструкції профілю поверхні достатньо визначати лише один параметр моделі Проні - набір миттєвих частот, а потім розрахувати повну фазу несучої. Таким чином, для розв'язання поставленої у роботі задачі немає необхідності обчислювати три інші параметри і відтворювати інтерферограму набором комплексних експонент, що знижує навантаження на обчислювальну потужність для реалізації даного методу реконструкції поверхні.

### 3.3.2. Адаптація сигналу інтерферограми до моделі Проні

Неможливо безпосередньо застосовувати метод Проні для розв'язання рівняння (1.6) відносно  $T$ , оскільки модель інтерферограми (1.6) не може бути



представлена у вигляді набору комплексних експонент. Для того, щоб перевірити придатність методу Проні досліджувалася можливість заміни огинаючої амплітуди сигналу інтерферограми (функції Гауса) косинусоїдальними вікнами [69].

Загальний вигляд сімейства косинусоїдальних вікон може бути описаний таким виразом [70]:

$$W(n) = w_0 + \sum_{i=1}^L \left[ w_i \cdot \cos\left(2\pi \frac{n}{N-1}\right) \right]. \quad (3.43)$$

де:

$N$  – кількість вибірок сигналу;

$w_i$  – сталі коефіцієнти, що визначаються за типом вікна;

$L$  – порядок вікна.

За збільшення порядку  $L$  вікна зменшуються похибки апроксимації огинаючої амплітуди сигналу інтерферограми (див. таблицю 3.4).

Таблиця 3.4

**Середньоквадратична похибка апроксимації огинаючої інтерферограми білого світла для косинусоїдальних вікон різних порядків**

Тип поверхні	Похибки апроксимації (%) від типу вікна			
	Ханна (I)	Блекмена (II)	Нагтола (III)	Блекмена-Харіса (III)
Лінійна ( $T=n$ )	5,6	2,5	0,38	0,28
Нелінійна ( $T=n^2$ )	4,9	2,3	0,36	0,25

Задовільні результати апроксимації отримані для віконних функцій третього порядку. Таким чином, огинаючу амплітуди інтерферограми можна апроксимувати вікном Блекмана-Харріса з коефіцієнтами  $w_0 = 0,35875$ ,  $w_1 = -0,48829$ ,  $w_2 = 0,14128$ ,  $w_3 = -0,01168$  та середньоквадратичною похибкою, що не перевищує 0,3%:

$$E(T) = e^{-\alpha T^2} \approx w_0 + w_1 \cdot \cos(\alpha \cdot T) + w_2 \cdot \cos(2\alpha \cdot T) + w_3 \cdot \cos(3\alpha \cdot T). \quad (3.44)$$

Нарешті із урахуванням (3.44), сигнал інтерферограми в цілому може бути представлений сумою незгасаючих косинусоїд:

$$\begin{aligned}
I(T) = I_M \cdot \exp^{-\alpha \cdot T^2} \cdot \cos(\beta \cdot T) = & I_M \cdot w_0 \cdot \cos \beta T + \\
& + I_M \cdot w_1 \cdot [\cos(\beta - \alpha)T + \cos(\beta + \alpha)T] + \\
& + I_M \cdot w_2 \cdot [\cos(\beta - 2\alpha) \cdot T + \cos(\beta + 2\alpha) \cdot T] + \\
& + I_M \cdot w_3 \cdot [\cos(\beta - 3\alpha) \cdot T + \cos(\beta + 3\alpha) \cdot T]
\end{aligned} \quad (3.45)$$

де:  $\alpha$  та  $\beta$  – сталі коефіцієнти, що визначаються параметрами джерела світла (п.2.4), тобто

$$\alpha = \frac{8 \cdot \Delta\lambda}{\lambda_0^2} \quad \text{і} \quad \beta = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda_0} .$$

### 3.3.3. Реалізація методу Проні для інтерферограми білого світла та оцінювання його обчислювальної ефективності

Аналіз сигналу інтерферограми (3.45), адаптованої до моделі Проні, показав, що на відтинках загасання огибаючої амплітуди (за межами центральної частини вікна), домінуючою компонентою є несуча частоти сигналу інтерферограми, тому, щоб визначити її повну фазу достатньо використати модель Проні другого порядку. Для формування матриці Тепліца для другого порядку моделі потрібні одне поточне значення вибірки  $n$  і три майбутні вибірки сигналу інтерферограми:

$$\begin{pmatrix} I_{n+1} & I_n \\ I_{n+2} & I_{n+1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{n+2} \\ I_{n+3} \end{pmatrix} . \quad (3.46)$$

Для визначеної у такий спосіб моделі Проні (на основі чотирьох вибірок сигналу) параметри сигналу інтерферограми (в тому числі поточної частоти  $f_n$ ) можна розглядати як постійне значення.

Після розв'язання системи рівнянь 2-го порядку, визначаються коефіцієнти  $A_1$  та  $A_2$ :

$$\begin{aligned}
A_{1n} &= \frac{I_n \cdot I_{n+3} - I_{n+1} \cdot I_{n+2}}{I_{n+1}^2 - I_n \cdot I_{n+2}}, \\
A_{2n} &= \frac{I_{n+2}^2 - I_{n+1} \cdot I_{n+3}}{I_{n+1}^2 - I_n \cdot I_{n+2}}
\end{aligned} \quad (3.47)$$

характеристичного рівняння:

$$z^2 + A_{1n} \cdot z + A_{2n} = (z - z_1) \cdot (z - z_2) = 0. \quad (3.48)$$

Корені рівняння визначаються за формулою:

$$z_{n1,n2} = -\frac{A_{1n}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A_{1n}}{2}\right)^2 - A_{2n}}. \quad (3.49)$$

Значення частоти несучої у поточних точках профілю поверхні обчислюються на основі рівняння (3.38):

$$f_n = \frac{1}{2\pi\Delta} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(z_n)}{\operatorname{Re}(z_n)}. \quad (3.50)$$

і можна розрахувати різницю оптичного шляху в окремих точках поверхні вздовж однієї аналізованої (1D) лінії інтерферограми:

$$T_n = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Phi(T) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \operatorname{cumsum} [2\pi \Delta f_n]. \quad (3.51)$$

Рис. 3.19 ілюструє послідовність обчислень, які потрібно виконати для реконструкції профілю поверхні за методом, що базується на моделі Проні.

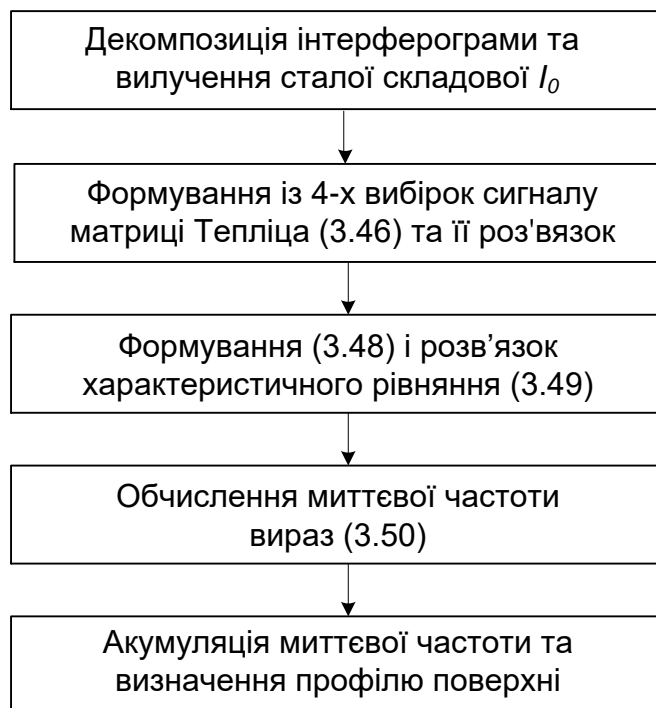


Рис. 3.19. Послідовність обчислювальних операцій за методом Проні для реконструкції профілю поверхні

Одержавши аналітичні вирази, що дають можливість реконструювати профіль поверхні на основі методу Проні, можна оцінити обчислювальну ефективність цього методу.

Метод Проні складається з двох ключових операцій – розв’язок матриці Тепліца, та пошук коренів квадратного рівняння. Відповідно до виразів (3.35)-(3.37) для розв’язку матриці Тепліца порядку 4, складність визначається за формулою

$$O(\text{toeplitz})=12. \quad (3.52)$$

Розв’язання квадратного рівняння потребує одне піднесення до квадрату, одне взяття кореня, два ділення і два додавання, отже його складність може бути оцінена так

$$O(\text{root})=O(x^2)+O(\sqrt{x})+2O\left(\frac{1}{x}\right)+2. \quad (3.53)$$

Підсумовуючи обчислювальні операції на всіх етапах реконструкції профілю поверхні, за методом, що базується на моделі Проні, одержуємо вираз кількості множень і додавань, які необхідно виконати у спецпроцесорі обробки сигналів інтенсивності інтерферограми:

$$\begin{aligned} O(MP) &= N \cdot O(\text{toeplitz}) + N \cdot O(\text{root}) + N \cdot O\left(\frac{1}{x}\right) + N \cdot O(\tan^{-1}) = \dots \\ &= N \left[ O(\text{toeplitz}) + O(x^2) + O(\sqrt{x}) + 3O\left(\frac{1}{x}\right) + 2 + O(\tan^{-1}) \right] = \dots \\ &= N [12 + 1 + (3k - 1) + 3 \cdot 3i + 2 + (3k - 1)] = N \cdot (12 + 6k + 9i + 1) \end{aligned} \quad (3.54)$$

За умови  $k=5$  та  $i=5$  обчислювальну ефективність методу можна оцінити виразом

$$O(MP) = N \cdot 88.$$

Отже, кількість додавань і множень, які має виконати спецпроцесор для реконструкції за даним методом профілю поверхні із одного рядка інтерферограми із  $N=1024$  пікселів складає

$$O(MP) = 90112.$$

### 3.3.4. Реконструкція профілю лінійної поверхні на основі моделі Проні та дослідження похибок для різних кутів нахилу

Аналіз точності методу Проні виконано на симульованих поверхнях із параметрами джерела світла  $\lambda_0 = 620$  нм і  $\Delta\lambda = 62$  нм (див. п. 2.4), тому коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  становлять:

$$\alpha = 0,323 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1} \text{ і } \beta = 20,3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}.$$

У результаті застосування методу реконструкції на основі моделі Проні відтворено профіль поверхні та обчислено за виразом (2.16) зведену похибку визначення висоти поверхні, тобто поточну похибку реконструкції профілю поверхні. Залежність зведеної похибки ілюструє рис. 3.20.

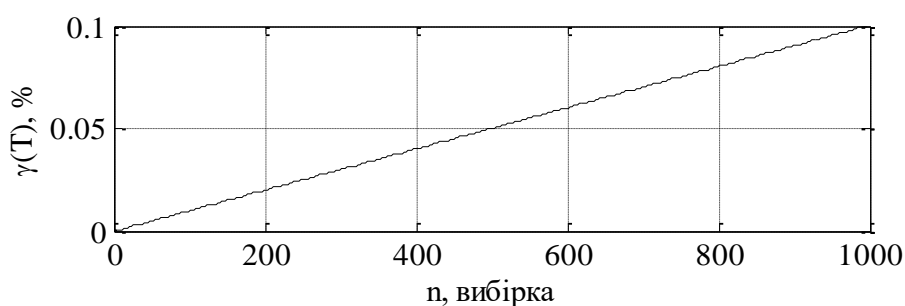


Рис. 3.20. Графік похибки реконструкції профілю лінійної поверхні методом, що базується на моделі Проні

Як видно із наведеного графіка, похибка реконструкції має мультиплікативний характер, оскільки лінійно зростає зі зміною вибірок сигналу інтерферограми, але не перевищує 0,1 % для кута нахилу  $\varphi = 500$  мкрад лінійної поверхні [71]. Таку похибку можна ефективно зменшити шляхом калібрування [72]. Таблиця 3.5 містить похибки реконструкції профілю лінійної поверхні (максимальні і середньоквадратичні) для різних кутів її нахилу.

Таблиця 3.5

#### Залежність максимальної і середньоквадратичної похибки реконструкції профілю лінійної поверхні для різних кутів її нахилу

$\varphi$ , $\mu\text{rad}$	1000	500	200	100	50	10	1	0,1	0,05	0,01
$\gamma_{\text{max}}$ , %	0,1	0,1	0,1	0,11	0,1	0,09	0,09	0,06	1,0	81
$\sigma_\gamma$ , %	0,06	0,06	0,06	0,1	0,06	0,06	0,05	0,03	0,06	47

Дослідження виявили суперечливий вплив кута нахилу на точність реконструкції профілю за методом Проні: для кутів нахилу ( $\varphi > 100$  мкрад) спостерігається негативний вплив огинаючої амплітуди (зниження рівня сигналу інтерферограми на початку і в кінці) на точність визначення поточної частоти несучої. Разом з тим, для кутів менших  $0,05$  мкрад похибка реконструкції різко зростає, що зумовлено поганою обумовленістю матриці Тепліца.

### 3.3.5. Реконструкція профілю сферичної поверхні на основі моделі Проні та дослідження похибок для різної кривизни

Вивчення властивостей методу реконструкції на основі моделі Проні для сферичної поверхні виконано за умов, вказаних у попередньому підпункті. На відміну від лінійної поверхні сигнали інтерферограми спостерігається нестационарність частоти несучої. Цей факт підтверджується результатами обчислень поточних значень частоти на основі моделі Проні (рис. 3.22) [71].

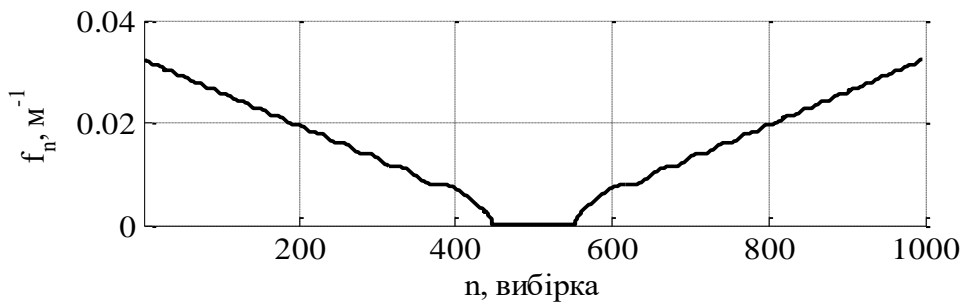


Рис. 3.21. Залежність поточної частоти несучої сигналу інтерферограми для сферичної поверхні від номера вибірки

На рис. 3.23,а показано результат реконструкції профілю 500-го рядка сферичної поверхні за методом Проні (для наочності показано центральний фрагмент) та на рис. 3.23,б графік похибки його реконструкції. В центрі поверхні виразно видно збільшення похибки реконструкції. Це зумовлено неузгодженістю сигналу інтерферограми і моделі Проні. Детальніший аналіз показав додатні значення дискримінанти характеристичного рівняння у діапазоні вибірок від 444 до 552, а отже відсутність уявних коренів  $z_k$ , звідси нульові значення миттєвих частот у цих пунктах. Це вимагає збільшення порядку моделі Проні, що супроводжувалося б зростанням складності обчислень. На рис. 3.23, в подано

похибку реконструкції профілю поверхні 50-го рядка інтерферограми. Максимальна похибка реконструкції становить 2,1 % (500-й рядок) та 1,6 % (50-й рядок), а зведена середньоквадратична – 1,0 % (500-й рядок) та 0,8 % (50-й рядок).

Також похибка містить явно виражену мультиплікативну складову, яку внаслідок калібрування можна ефективно зменшити [73].

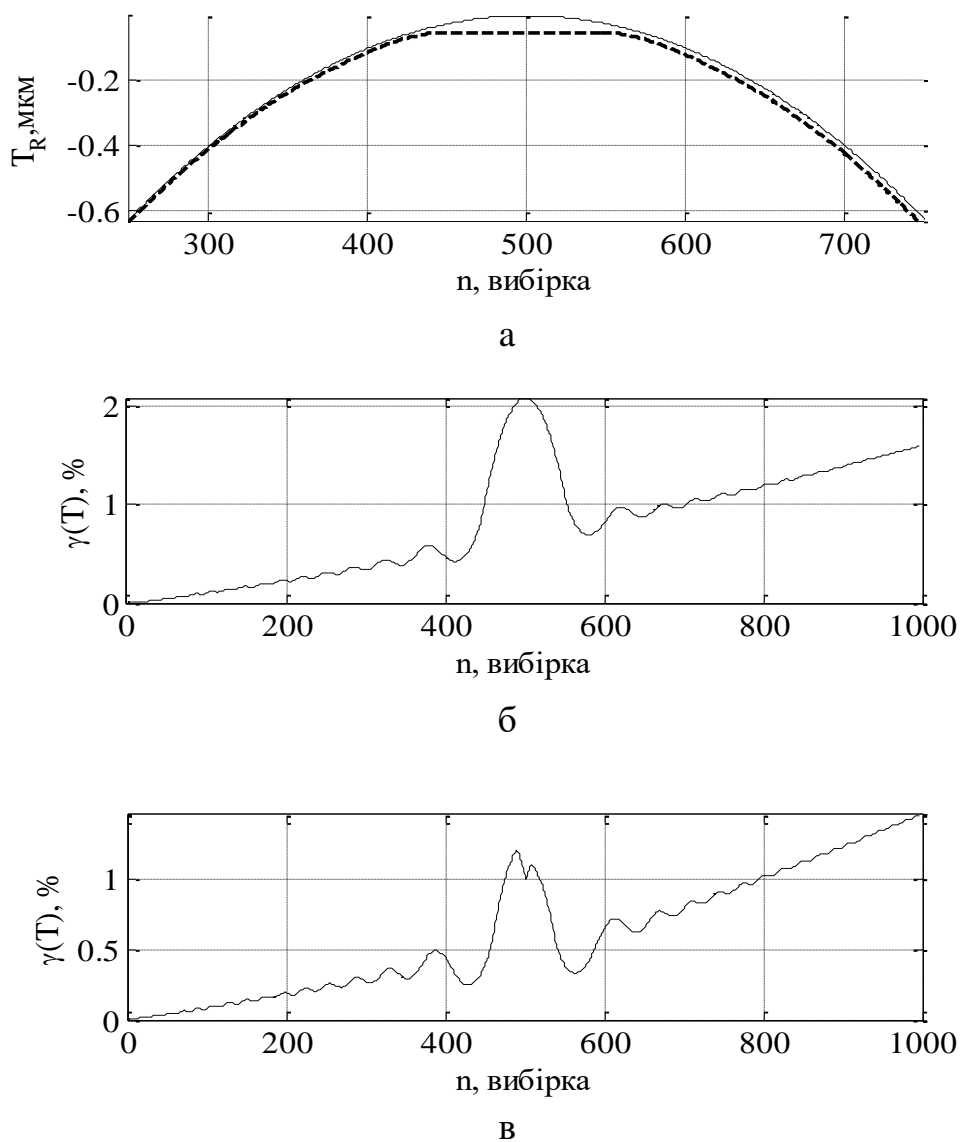


Рис. 3.22. Вигляд профілю 500-го рядка сферичної поверхні до(суцільна лінія) і після реконструкції (потовщена пунктирна) методом, що базується на моделі Проні (а) та графіки похибки реконструкції 500-го (б) та 50-го рядків

Таблиця 3.6 містить похибки реконструкції (максимальні і середньоквадратичні) профілю сферичної поверхні для різної кривизни, що оцінюється висотою сегменту сфери.

Таблиця 3.6

**Залежність максимальної і середньоквадратичної похибки реконструкції профілю сферичної поверхні для різної кривизни**

$T_{max}, \mu\text{m}$	2,5	1	0,5	0,2	0,1
$\gamma_{max}, \%$	2,1	4	8	18	35
$\sigma_{\gamma}, \%$	1,0	1,6	3	9	19

Зменшення висоти сегменту сфери призводить до відносного розширення середньої частини сигналу інтерферограми, де метод Проні 2-го порядку втрачає стабільність (дискримінанта характеристичного рівняння має додатні значення), а отже збільшується похибка реконструкції висоти окремих точок досліджуваної сферичної поверхні. Але у центрі інтерферограми можна застосувати безпосереднє виділення миттєвої фази, оскільки на цій ділянці сигналу інтерферограми вплив огинаючої амплітуди не проявляється, а обчислені значення функції арккосинус припадають на головний інтервал.

З огляду на властивості методу на основі моделі Проні, його також можна застосовувати для реконструкції складних нелінійних поверхонь. Цей метод придатний до розпаралелення по точках.

### **3.4. Реконструкція поверхні на основі моделі аналітичного сигналу**

З погляду теорії сигналів модель інтерферограми білого світла є вузькосмуговим процесом, зосередженим довкола частоти, що визначається середньою довжиною хвилі джерела світла:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}. \quad (3.55)$$

Аналіз цього типу сигналів зручно виконувати спираючись на їх аналітичну репрезентацію, що дає змогу розширити поняття амплітуди і фази на негармонічні сигнали [74, 75].

Розглянемо клас гармонічних сигналів із круговою частотою  $\omega_0$  із змінною в часі амплітудою  $A(t)$  і початковою фазою  $\varphi(t)$



$$s(t) = A(t) \cdot \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] . \quad (3.56)$$

Складову  $A(t)$  моделі (4.2) називають огинаючою амплітуди, а величину  $\varphi(t)$  – функцією фази. Аргумент функції косинус означає повну фазу сигналу

$$\Phi(t) = \omega_0 t + \varphi(t) . \quad (3.57)$$

Узагальненням моделі (3.47) дійсного сигналу  $s(t)$  є його комплексна форма, тобто модель аналітичного сигналу. Аналітичний сигнал  $S_A(t)$  утворюється із аналізованого дійсного сигналу  $s(t)$  шляхом додавання до нього уявної частини  $s_Q(t)$ , яка є квадратурним доповненням до  $s(t)$

$$S_A(t) = s(t) + j \cdot s_Q(t) . \quad (3.58)$$

Комплексний аналітичний сигнал  $S_A(t)$  можна записати як у декартовій системі (3.49), так і у полярній

$$S_A(t) = A(t) \cdot \exp[j \cdot \Phi(t)] , \quad (3.59)$$

де

$$A(t) = \text{Mod} [S_A(t)] = [s^2(t) + s_Q^2(t)]^{1/2} \quad (3.60)$$

є огинаючою амплітуди, а

$$\Phi(t) = \text{Arg} [S_A(t)] = \text{arctg}[s_Q(t) / s(t)] \quad (3.61)$$

- фазою сигналу.

Інструментом синтезу аналітичного сигналу є перетворення Гільберта, яке для довільного дійсного сигналу  $s(t)$  забезпечує формування його ненульового «квадратурного еквіваленту»  $s_Q(t)$ , що задовольняє умову

$$\int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s_Q(t) dt = 0 . \quad (3.62)$$

Аналітичний вираз перетворення Гільберта має вигляд [56,75]

$$s_Q(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau . \quad (3.63)$$

де  $s(\tau)$  і  $s_Q(t)$  – відповідно аналізований вхідний сигнал та його квадратурна компонента (вихідний сигнал);

$\tau$  і  $t$  – відповідно аргумент (незалежна змінна) для вхідного (аналізованого) вхідного сигналів.

Інтеграл (3.62) має структуру згортки аналізованого сигналу із  $s(t)$  функцією:

$$h(t) = 1/\pi t, \quad (3.64)$$

яка є ядром перетворення Гільберта. Функцію, що описується виразом (3.55), можна трактувати як імпульсну характеристику лінійної системи, яка реалізує перетворення Гільберта [76]. Далі можна визначити частотну передатну функцію цієї системи

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\pi t} e^{-j\omega t} dt = \begin{cases} j, & \omega < 0 \\ 0, & \omega = 0 \\ -j, & \omega > 0 \end{cases}. \quad (3.65)$$

Перетворення Гільберта дає можливість одержати квадратурне доповнення аналізованого сигналу  $s(t)$ , як сигнал  $s_Q(t)$ , кожна із гармонічних складових, що міститься у спектрі  $s(t)$  зазнала фазового зсуву на  $90^\circ$ . На практиці для реальних сигналів за допомогою перетворення Гільберта визначається квадратурне доповнення (комплексний спряжений сигнал) лише у наближенні (із певною похибкою) з огляду на скінченні границі інтегрування.

В дискретному вигляді перетворення Гільберта описується виразом [77]:

$$s_Q(m) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{s(n)}{n-m} \quad (3.66)$$

де  $s(n)$  і  $s_Q(m)$  – вибірки вхідного і вихідного квадратурного сигналів;

$n$  і  $m$  – аргументи вхідного та вихідного сигналів.

Для прикладу, у пакеті MATLAB для формування аналітичного сигналу існує вбудована функція `hilbert(*)`, яка використовує такий алгоритм:

- обчислення швидкого перетворення Фур'є (FFT) аналізованого сигналу;
- онулення спектру у області від'ємних частот;

- виконання зворотного швидкого перетворення Фур'є (IFFT).

В наступних пунктах цього розділу представлено чотири методи реконструкції профілю і топології поверхні із інтерферограми білого світла, що базуються на моделі аналітичного сигналу. У зв'язку із необхідністю обчислення прямого і зворотного перетворення Фур'є ця група методів придатна до розпаралелення лише по рядках [77].

### 3.5. Метод реконструкції профілю поверхні із огибаючої амплітуди аналітичного сигналу

Як випливає із моделі інтерферограми білого світла інформативний параметр  $T$  можна визначити із виразу (1.3), що описує огибаючу амплітуди [78,79]:

$$T = \frac{\lambda_0^2}{2\sqrt{2} \cdot \Delta\lambda} \sqrt{-\ln \left[ \frac{\tilde{E}(T)}{I_M} \right]} \quad (3.67)$$

Оцінка огибаючої амплітуди  $\tilde{E}(T)$  сигналу інтерферограми може бути обчислена згідно виразу (5.60). З цією метою за допомогою перетворення Гільберта потрібно визначити квадратурну складову сигналу інтерферограми:

$$I_Q(T) = \mathbf{H}\{ I_L(T) \}, \quad (3.68)$$

де  $\mathbf{H}\{ * \}$  – оператор Гільберта;

$I_L(T)$  – сигналу інтерферограми із вилученою сталою складовою

$$I_L(T) = I(T) - I_0. \quad (3.69)$$

Оскільки квадратурне доповнення визначається із певною похибкою, можна одержати лише оцінку огибаючої амплітуди із обмеженою точністю за формулою:

$$\tilde{E}(T) = \text{Mod}[\dot{I}(T)] = [I_L^2(T) + I_Q^2(T)]^{1/2}, \quad (3.70)$$

де  $\dot{I}(T)$  – сигнал інтенсивності інтерферограми у комплексній формі.

Нижче на рис. 3.25 подано графіки сигналу інтерферограми для лінійної поверхні, а також одержана на основі моделі аналітичного сигналу оцінка огибаючої амплітуди (за Гільбертом).

Для сферичної поверхні сигнали інтерферограми залежать від номеру рядка, тобто вертикальної координати інтерферометричної картини по осі  $y$ . Як приклад,

на рис. 3.26 показано сигнали інтерферограми для центрального 500-го рядка і наближеного до краю 50-го рядка.

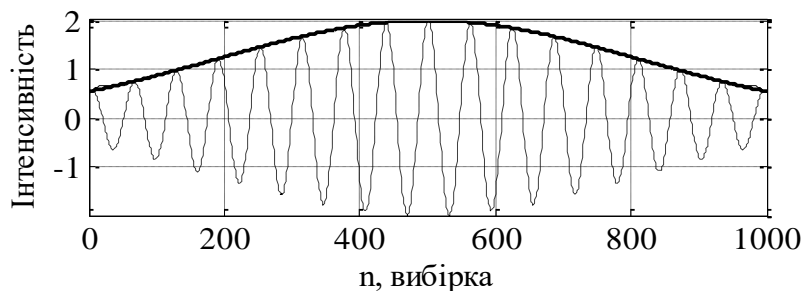
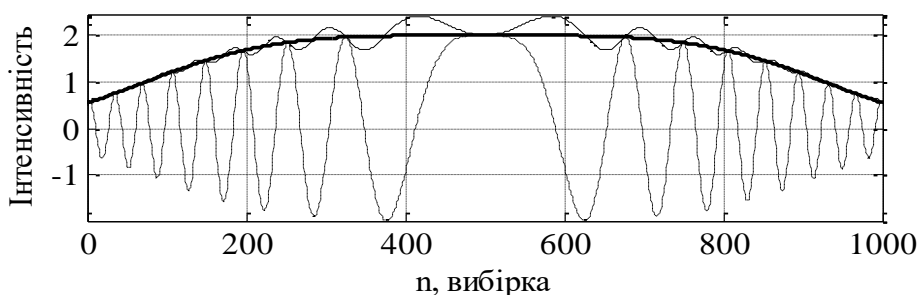
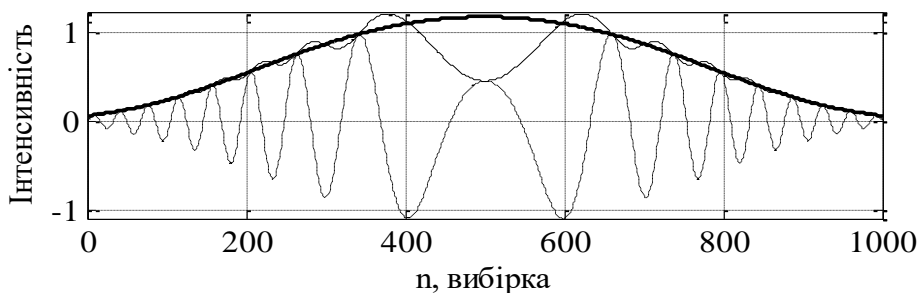


Рис. 3.23. Сигнал інтерферограми (пунктирна лінія) та оцінка огинаючої амплітуди за Гільбертом (потовщена лінія) для лінійної поверхні



а



б

Рис. 3.24. Ідеальна огинаюча амплітуди інтерферограми (потовщена лінія) та її оцінка за Гільбертом (суцільна лінія) для сферичної поверхні центральний 500-тий рядок (а) та 50-тий рядок (б)

Як видно з рис. 3.25, у випадку лінійної поверхні оцінка огинаючої амплітуди сигналу інтерферограми, отримана за допомогою перетворення Гільберта, практично збігається із ідеальною огинаючою. Похибка оцінки огинаючої амплітуди зумовлюється перетіканням спектру, а її середньоквадратичне зведене значення (3.15) становить 0,6 %.

Для сферичної поверхні оцінка огинаючої амплітуди сигналу інтерферограми за Гільбертом істотно відхиляється від ідеальної огинаючої амплітуди. На рис. 3.21

виразно помітні коливання оцінки огинаючої амплітуди, причому рівень цих коливань зростає у центральній частині інтерферограми. Значення середньоквадратичної зведеної похибки (3.15) становить 8,0 % для 500-го рядка і 16 % для 50-го рядка. Було встановлено, що причиною виникнення похибки є накладання спектрів огинаючої амплітуди та несучої, ефект якого підсилюється у центрі інтерферограми через зменшення частоти несучої.

Для пошуку шляхів зниження похибок проведено порівняльний аналіз спектрів ідеальної огинаючої амплітуди сигналу інтерферограми сферичної поверхні та її оцінки за Гільбертом (рис. 3.27).

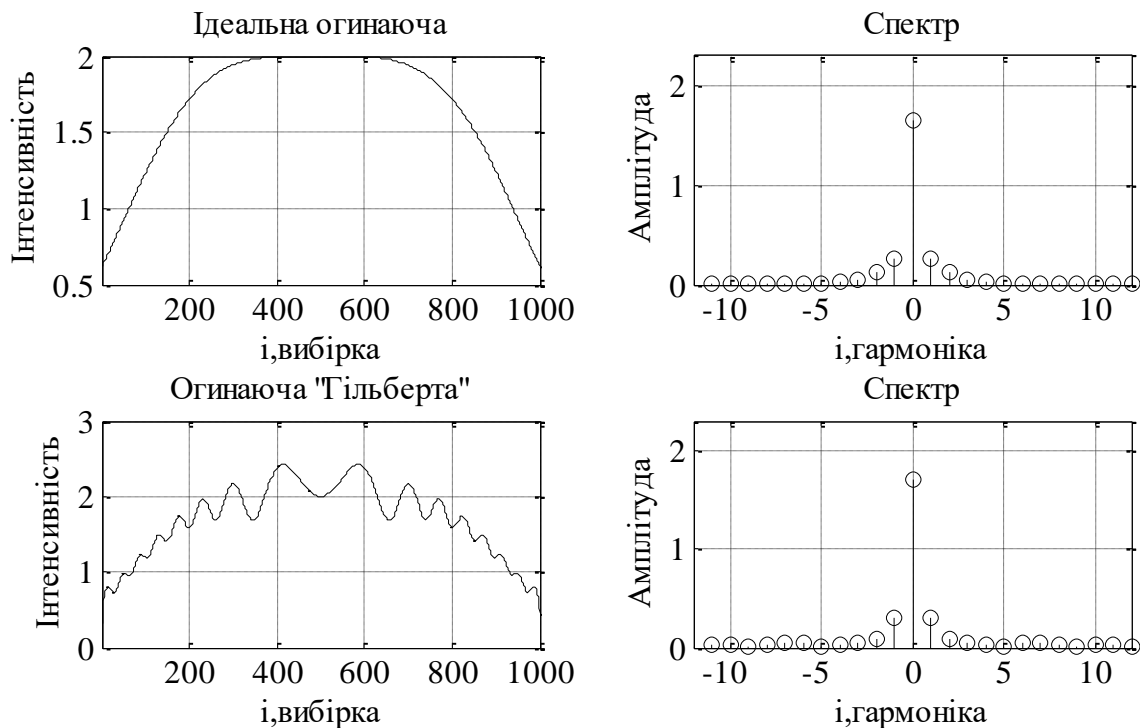


Рис. 3.25. Спектри ідеальної огинаючої амплітуди та оцінки огинаючої амплітуди за Гільбертом

Як впливає із рисунку, спектр ідеальної огинаючої амплітуди містить гармоніки в області низьких частот, в той час як у спектрі оцінки огинаючої амплітуди за Гільбертом окрім низькочастотних наявні і високочастотні компоненти, що є причиною спотворення результатів.

Для придушення високочастотних коливань у оцінці огинаючої амплітуди за Гільбертом застосовано їх онулення за допомогою дискретного перетворення Фур'є. Результати коригування спектру оцінки огинаючої наведено на рис. 3.28.

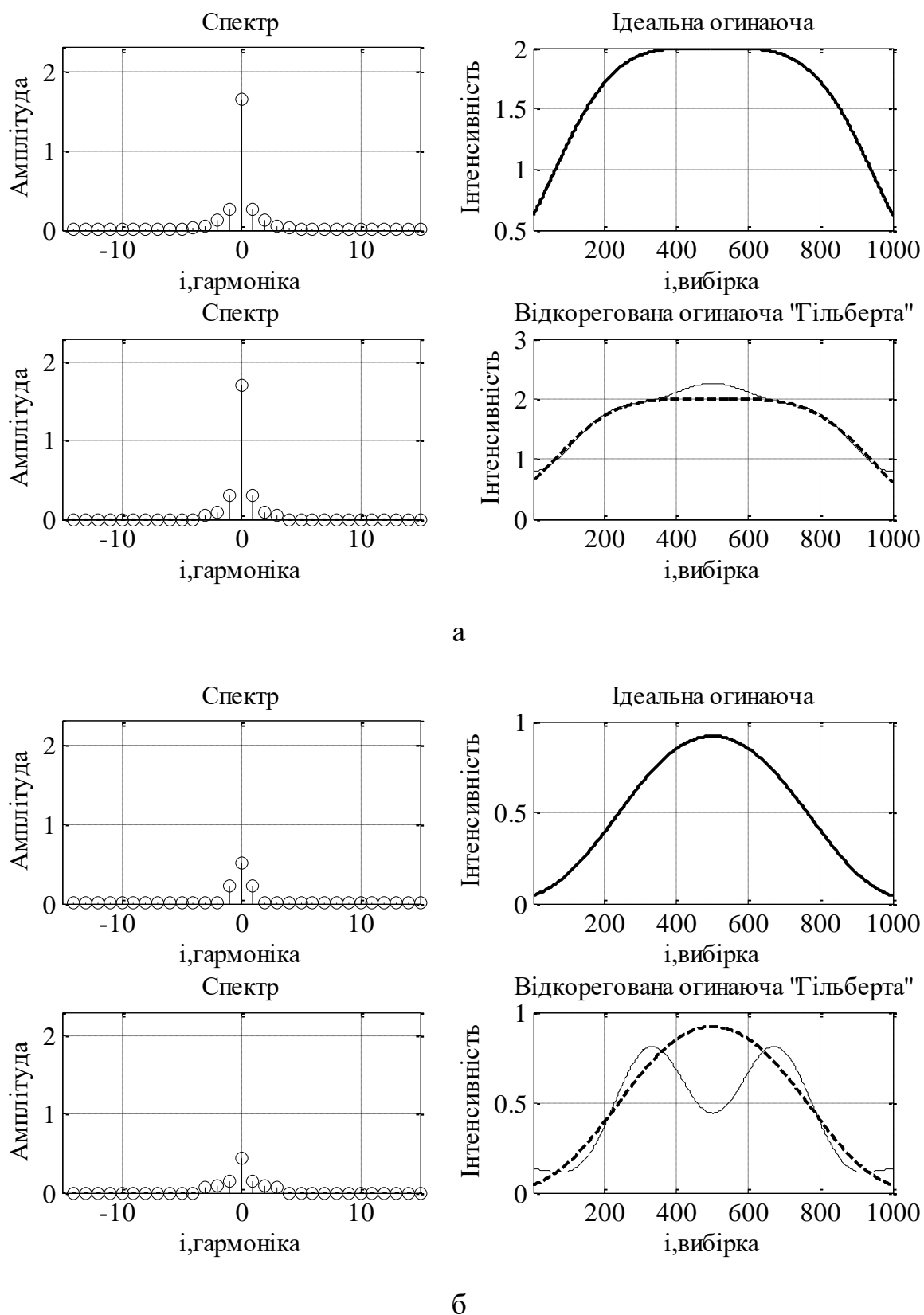


Рис. 3.26. Скоригований спектр та оцінка огинаючої амплітуди за Гільбертом

Загалом придушення вищих гармонік дає покращення результатів оцінки огинаючої амплітуди за Гільбертом. Для центрального рядка розбіжність має місце посередині огинаючої амплітуди (рис. 3.28,а), а зведена середньоквадратична

похибка складає 5,0 %. Але ефективність такого коригування знижується (19 %), коли в центрі сигналу спостерігається інтерферометричний мінімум. Результати корекції для віддаленого від центру рядка інтерферограми представлено на рис. 3.28,б.

Результати оцінки огинаючої амплітуди можна застосувати для реконструкції профілю поверхні. За цим методом реконструкція профілю із сигналу інтерферограми передбачає виконання таких обчислень (рис. 3.29).

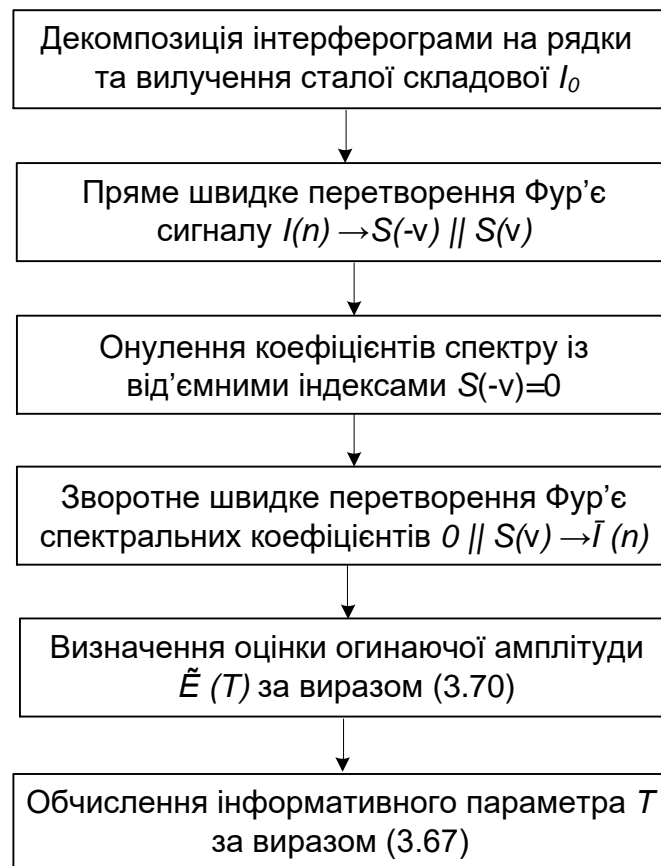


Рис. 3.27. Послідовність обчислень для визначення профілю поверхні із оцінки за Гільбертом огинаючої сигналу інтенсивності

Розглянутий метод реконструкції як і кілька наступних базуються на дискретному перетворенні Гільберта. Оскільки практична реалізація цього перетворення заснована на алгоритмі прямого і зворотного швидкого перетворення Фур'є, тому із урахуванням онулення половини коефіцієнтів кількість додавань і множень можна обчислити так [56,77,80]

$$O(H) = N(N + \log_2 N) + N \left( \frac{N}{2} + \log_2 \frac{N}{2} \right) = N \left( \frac{3}{2} N + 2 \log_2 N - 1 \right) \quad (3.71)$$

де  $N$  - кількість точок задіяних у перетворенні Гільберта (по суті кількість пікселів в одному рядку інтерферограми).

Враховуючи наступні за перетворенням Гільберта вирази (див. рис. 3.23,а), обчислювальну ефективність методу огинаючої амплітуди одержаною на базі перетворення Гільберта можна оцінити виразом:

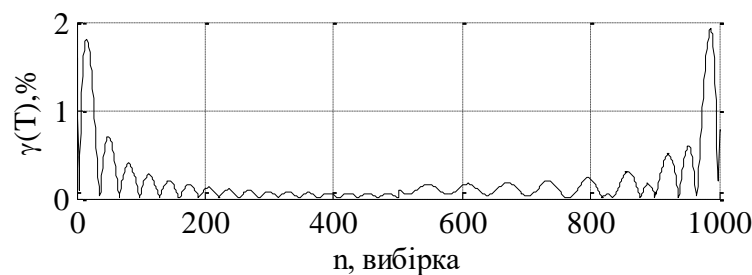
$$\begin{aligned} O(OG) &= O(H) + N \cdot O(x^2) + N \cdot O(\sqrt{x}) + N \cdot O(\ln) + N \cdot O(\sqrt{x}) = \dots \\ &= N \left( \frac{3}{2} N + 2 \log_2 N - 1 \right) + 2N + N(3k - 1) + N(3k - 1) + N(3k - 1) = \\ &= N \left[ \frac{3}{2} N + 2 \log_2 N + 9k - 2 \right] \end{aligned} \quad (3.72)$$

Отже, кількість додавань і множень, які має виконати спецпроцесор для реконструкції за даним методом профілю поверхні із одного рядка інтерферограми з  $N=1024$  пікселів складає

$$O(OG) = 1599 N \approx 1,64 \times 10^6 \quad (3.73)$$

Для оцінювання критерію точності досліджувалися похибки методу згідно методики досліджень наведеної у п. 2.5. На рис. 3.30 подано похибки реконструкції профілю лінійної та сферичної поверхонь із виразу огинаючої амплітуди.

Як показали результати досліджень, визначення профілю сферичної поверхні із оцінки огинаючої амплітуди одержаної за використання дискретного перетворення Гільберта супроводжується недопустимо великими похибками. Це зумовлено накладанням спектрів огинаючої амплітуди і несучої частоти у області низьких частот. Тому досліджувалися інші методи реконструкції, в основі яких лежить перетворення Гільберта.



а



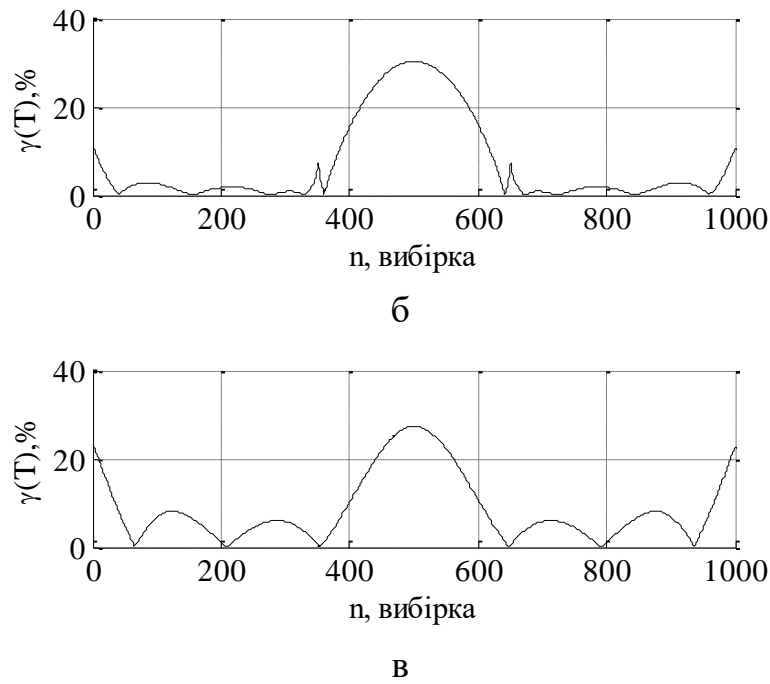


Рис. 3.28. Похибки реконструкції профілю лінійної (а) та сферичної поверхні 500-й (б) та 50-й (в) рядки за методом оцінки за Гільбертом огинаючої амплітуди

### 3.6. Метод реконструкції профілю поверхні із нормалізованого за Гільбертом сигналу інтерферограми

Цей метод збігається із розглянутим у пп. 3.1.2 і 3.1.3 із тією різницею, що нормалізація за виразом (3.2) відбувається на основі оцінки огинаючої амплітуди, яка одержана за допомогою перетворення Гільберта.

На рис. 3.31 наведено послідовність обчислень, які потрібно виконати, щоб реконструювати профіль поверхні за методом нормалізації сигналу інтенсивності його огинаючою, одержаною на базі перетворення Гільберта.

На підставі наведеного рисунку можна оцінити обчислювальну складність цього методу реконструкції:

$$\begin{aligned}
 O(H\Gamma) &= O(H) + N \cdot O(x^2) + N \cdot O(\sqrt{x}) + N \cdot O\left(\frac{1}{x}\right) + N \cdot O(\cos^{-1}) = \\
 &= N \left( \frac{3}{2} N + 2 \log_2 N - 1 \right) + 2N + N(3k - 1) + 3Ni + N(3k - 1) = \\
 &= N \left[ \frac{3}{2} N + 2 \log_2 N + 6k + 3i - 1 \right]
 \end{aligned} \tag{3.74}$$

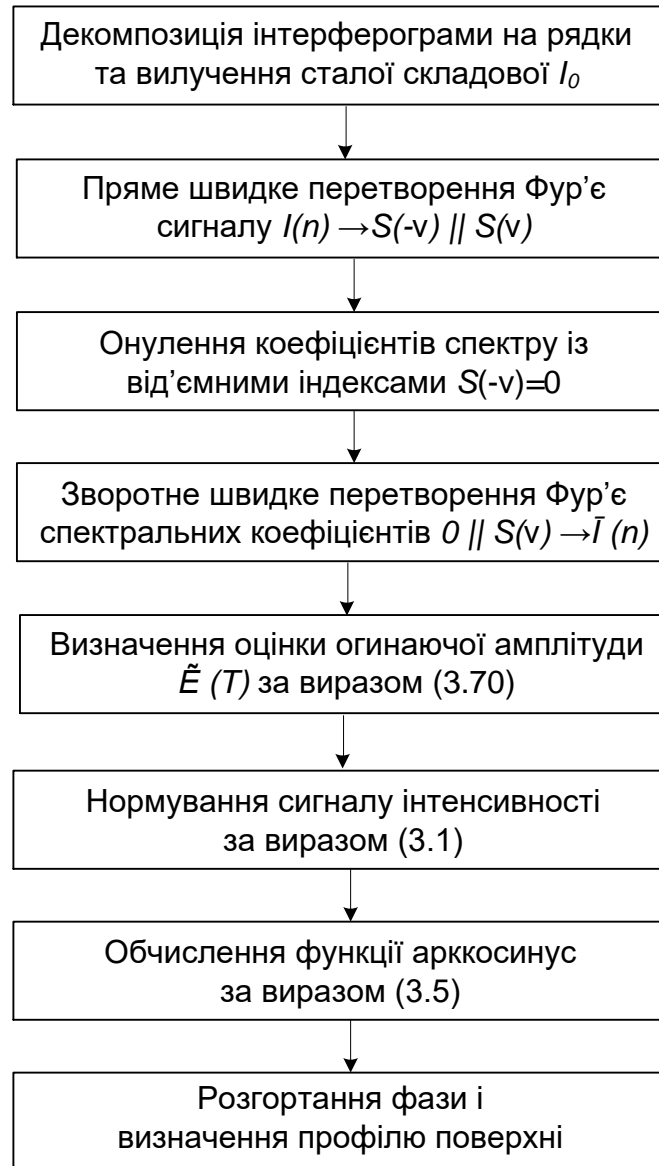


Рис. 3.29. Послідовність обчислень для визначення профілю поверхні за методом нормалізації сигналу інтенсивності оцінкою огинаючої за Гільбертом

Отже, кількість додавань і множень, які має виконати спецпроцесор для реконструкції за даним методом профілю поверхні із одного рядка інтерферограми з  $N=1024$  пікселів складає

$$O(HF) = 1600 N \quad O \approx 1,64 \times 10^6 \quad (3.75)$$

Далі наведено результати досліджень точності реконструкції профілю поверхні. На рис. 3.32 наведено вигляд похибок реконструкції профілю лінійної поверхні із нормалізованого за Гільбертом сигналу інтерферограми.

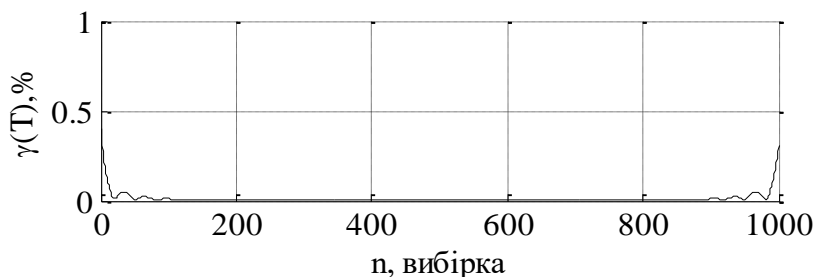
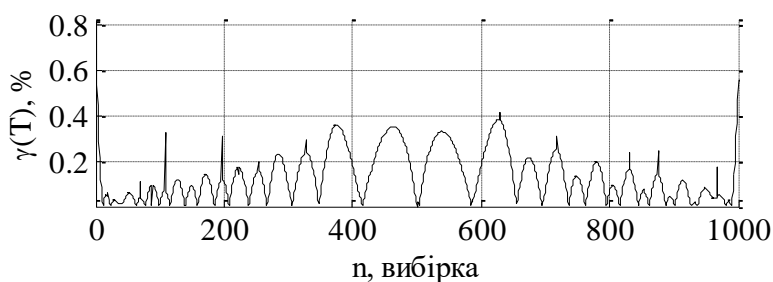


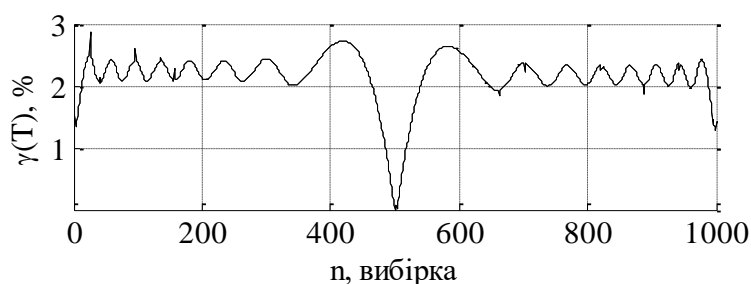
Рис. 3.30. Похибка реконструкції профілю лінійної поверхні

При реконструкції профілю лінійної поверхні, максимальна зведена похибка становить 0,4 %, а значення середньоквадратичної – 0,03 %. Різниця більш ніж на порядок цих похибок свідчить про нестабільність цього методу на краях інтерферограми.

На рис. 3.33 наведено вигляд похибок реконструкції профілю сферичної поверхні із нормалізованих за Гільбертом сигналів інтерферограми.



а



б

Рис. 3.31. Похибка реконструкції профілю сферичної поверхні для 500-го рядка (а) і 50-го рядка (б)

Максимальна зведена похибка реконструкції профілю сферичної поверхні становить 500-го рядка 0,8 %, а для 50-го рядка – 2,8 %. Значення середньоквадратичної зведеної похибки відповідно дорівнюють 0,17 % і 2,2 %. На основі одержаних результатів можна стверджувати про високий рівень інваріантності цього методу до похибки оцінки огинаючої амплітуди сигналу

інтерферограми (похибки реконструкції профілю сферичної поверхні у кілька разів менша порівняно із похибками оцінки огинаючої амплітуди). Одержані результати також підтверджують нестабільність методу на краях інтерферограми: середньоквадратична зведена похибка відтворення профілю на основі віддаленого від центру 50-го рядка інтерферограми більш ніж на порядок перевищує аналогічну для центрального рядка.

### 3.7. Метод реконструкції профілю поверхні із миттєвої фази аналітичного сигналу інтенсивності інтерферограми

Наявність реального сигналу інтерферограми  $I_L(T)$  і його наближеного квадратурного доповнення  $I_Q(T)$ , що одержане за допомогою дискретного перетворення Гільберта, дає змогу оцінити не лише його огинаючу амплітуди, але також визначити миттєві значення фази несучої згідно виразу (3.61):

$$\Phi(n) = \operatorname{arctg} \left[ \frac{I_Q(n)}{I(n) - I_0} \right] \quad (3.76)$$

а після масштабування і розгортання фази можливе відновлення інформативного параметра:

$$T_n = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \pi} \operatorname{unwrap} [\Phi(n)] \quad (3.77)$$

Удавана легкість цього методу на практиці створює такі обчислювальні проблеми:

- ділення на нульові значення сигналу інтерферограми із вилученою сталою складовою;
- неоднозначність функції арктангенс для кутів, що знаходяться у I і III або у II і IV квадранті;
- неоднозначність спричинена періодичністю функції арктангенс, що виражається стрибками фази в діапазоні  $\pm\pi/2$ .

Ділення на нуль у аргументі функції арктангенс призводить до неоднозначного обчислення її значення  $+\pi/2$  чи  $-\pi/2$ . Отже потрібно додатково

аналізувати знак уявної частини: для додатних значень слід прийняти значення  $+\pi/2$  радіан, а для від'ємних відповідно  $-\pi/2$  радіан.

Для вирішення другої проблеми неоднозначність функції арктангенс в парних і непарних квадрантах потрібно після обчислення фази проаналізувати знаки дійсної та уявної частин. Якщо обидві складові є від'ємні, то від обчисленого значення фази потрібно відняти  $\pi$  радіан, якщо дійсна частина є від'ємна, а уявна додатна – потрібно додати  $\pi$  радіан.

Вирішення проблеми зумовленої періодичністю функції арктангенс вимагає так званого розгортання фази (ang. phase unwrapping). Ця спеціальна процедура забезпечує неперервність фази (відсутність стрибків) і реалізована у такий спосіб: до обчисленого значення фази додається або віднімається добуток  $2\pi$  із деяким цілим числом, щоб мінімізувати різницю між сусідніми значеннями фази [17].

Підсумовуючи, реконструкція профілю поверхні методом оцінки миттєвих значень фази передбачає таку послідовність обчислень рис. 3.34.

Метод на основі миттєвої фази інтерферограми, одержаної за допомогою перетворення Гільберта

$$\begin{aligned}
 O(\Phi A) &= O(H) + 2N \cdot O\left(\frac{1}{x}\right) + N \cdot O(\tan^{-1}) = \dots \\
 &= N\left(\frac{3}{2}N + 2\log_2 N - 1\right) + 2 \cdot 3Ni + N(3k - 1) = \\
 &= N\left[\frac{3}{2}N + 2\log_2 N + 6i + 3k - 2\right]
 \end{aligned}
 \tag{3.78}$$

Отже, кількість додавань і множень, які має виконати спецпроцесор для реконструкції за даним методом профілю поверхні із одного рядка інтерферограми із  $N=1024$  пікселів складає

$$O(\Phi A) = 1599 MN \approx 1,64 \times 10^6
 \tag{3.79}$$

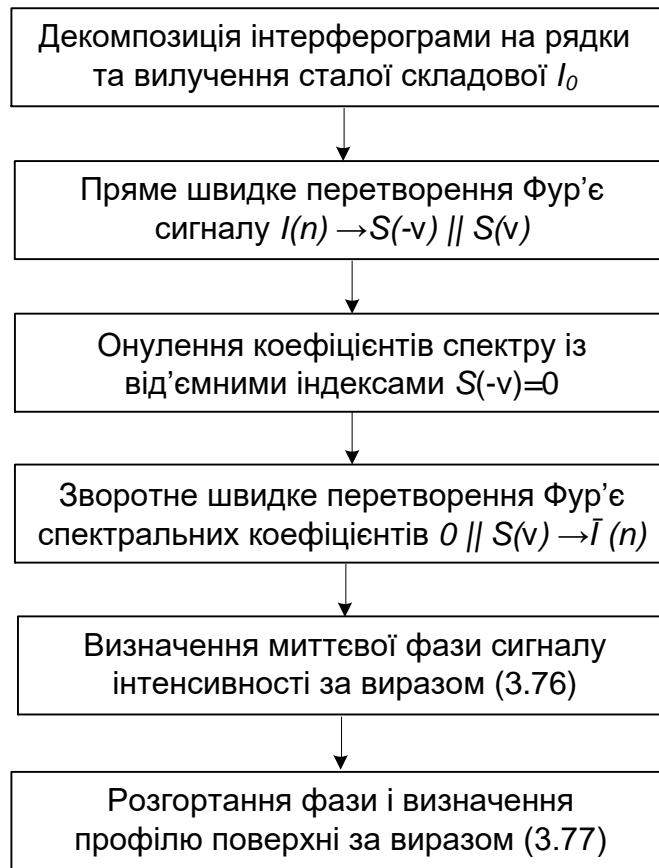


Рис. 3.32. Послідовність обчислень для реконструкції профілю поверхні за методом акумуляції миттєвої фази сигналу інтенсивності інтерферограми

Нижче подано результати дослідження точності реконструкції профілю поверхні за даним методом. Зокрема на рис. 3.35 наведено вигляд похибок реконструкції профілю лінійної поверхні із миттєвої фази сигналу інтерферограми. Найбільші значення спостерігаються на краях інтерферограми. Максимальна зведена похибка реконструкції профілю лінійної поверхні становить 0,4 %, а значення середньоквадратичної зведеної похибки – 0,03 %.

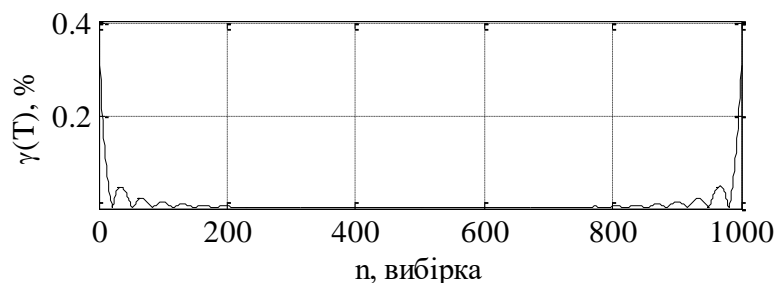
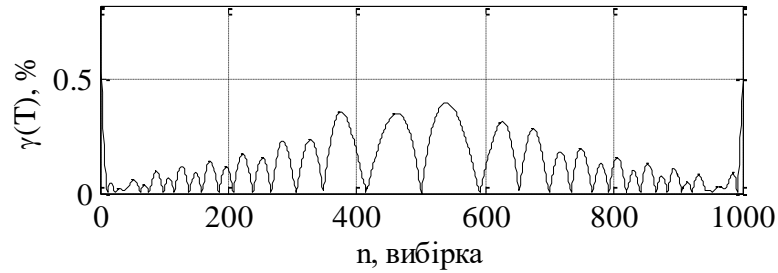


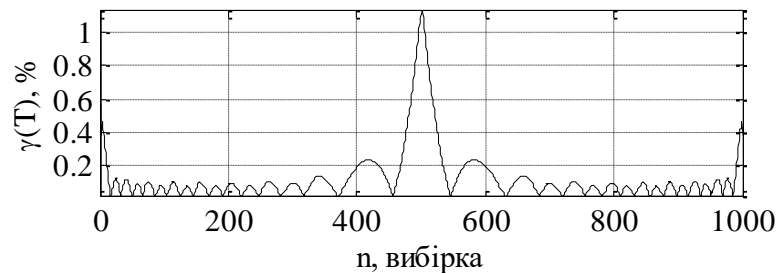
Рис. 3.33. Похибка реконструкції профілю лінійної поверхні

На рис. 3.36 представлено результати досліджень точності реконструкції профілю сферичної поверхні за описаним методом.

Як видно з графіків, похибки реконструкції мають коливний характер. Найбільші значення спостерігаються на краях та в центрі інтерферометричної картини. Максимальна зведена похибка реконструкції профілю сферичної поверхні становить 500-го рядка 0,8 %, а для 50-го рядка – 1,4 %. Значення середньоквадратичної зведеної похибки відповідно дорівнюють 0,17 % і 0,4 %.



а



б

Рис. 3.34. Похибка реконструкції профілю сферичної поверхні для 500-го рядка (а) і 50-го рядка (б)

Метод реконструкції, який ґрунтується на оцінці миттєвої фази сигналу інтерферограми показав вищу точність порівняно із методами, що спираються на оцінку огинаючої амплітуди. Проте практична реалізація цього методу пов'язана із вирішенням невизначеності, неоднозначності і періодичності функції арктангенс.

### 3.8. Метод реконструкції профілю поверхні із логарифмованого аналітичного сигналу

Ідея цього методу полягає на формуванні аналітичного сигналу, тобто комплексної версії інтерферограми, шляхом додавання квадратурного доповнення  $I_Q(T)$  одержаного за допомогою дискретного перетворення Гільберта [81]:

$$\dot{I}(T) = I(T) + j \cdot I_Q(T) = \tilde{E}(T) \cdot e^{j\tilde{\Phi}(T)}, \quad (3.80)$$

де  $\tilde{E}(T)$  – оцінка огинаючої амплітуди сигналу інтерферограми;

$\tilde{\Phi}(T)$  – оцінка повної фази сигналу інтерферограми.

Логарифмуючи наведений вираз (3.80)

$$\ln[I(T)] = \ln[\tilde{E}(T) \cdot e^{j \cdot \tilde{\Phi}(T)}] = \underbrace{\ln[\tilde{E}(T)]}_{real} + \underbrace{j \cdot \tilde{\Phi}(T)}_{imag} \quad (3.81)$$

Звідси у простий спосіб із уявної частини виразу (3.81) можна визначити повну фазу несучої частоти

$$T = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \pi} \cdot \text{Im}[\ln(I)]. \quad (3.82)$$

Такий підхід покладено в основу розробленого методу реконструкції профілю поверхні, в якому можна виділити такі етапи обчислень (рис. 3.37).

Метод на основі миттєвої фази, одержаної шляхом логарифмування та перетворення Гільберта

$$\begin{aligned} O(ЛА) &= O(H) + N \cdot O(\ln) = \dots \\ &= N \left( \frac{3}{2} N + 2 \log_2 N - 1 \right) + N(3k - 1) = N \left[ \frac{3}{2} N + 2 \log_2 N + 3k - 2 \right] \end{aligned} \quad (3.83)$$

Отже, кількість додавань і множень, які має виконати спецпроцесор для реконструкції за даним методом профілю поверхні із одного рядка інтерферограми із  $N=1024$  пікселів складає

$$O = 1569 N \approx 1,61 \times 10^6 \quad (3.84)$$



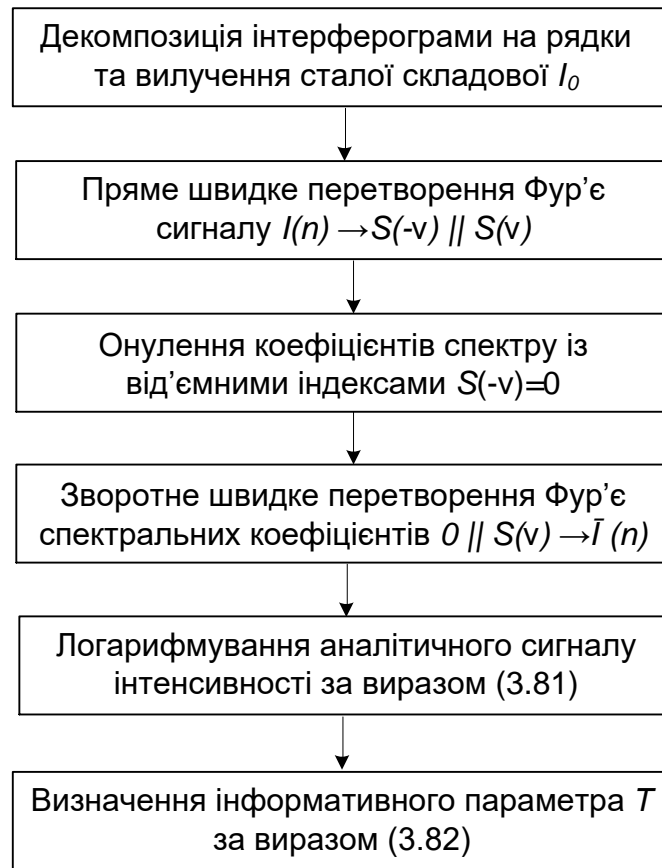


Рис. 3.35. Послідовність обчислень для реконструкції профілю поверхні за методом логарифмування аналітичного сигналу інтерферограми

За критерієм точності даний метод показав подібні результати як і метод, розглянутий у попередньому пункті. На рис. 3.38 наведено зведену похибки реконструкції лінійної поверхні. Значення максимальної похибки не перевищує 0,4%.

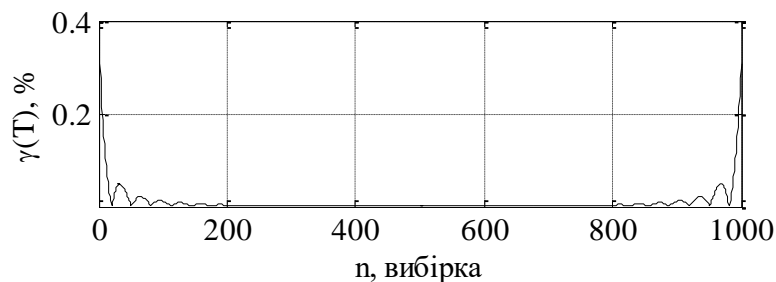


Рис. 3.36. Похибка реконструкції лінійної поверхні

На рис. 3.39 наведено зведені похибки реконструкції центрального 500-го рядка та віддаленого від центру 50-го рядка інтерферограми сферичної поверхні.

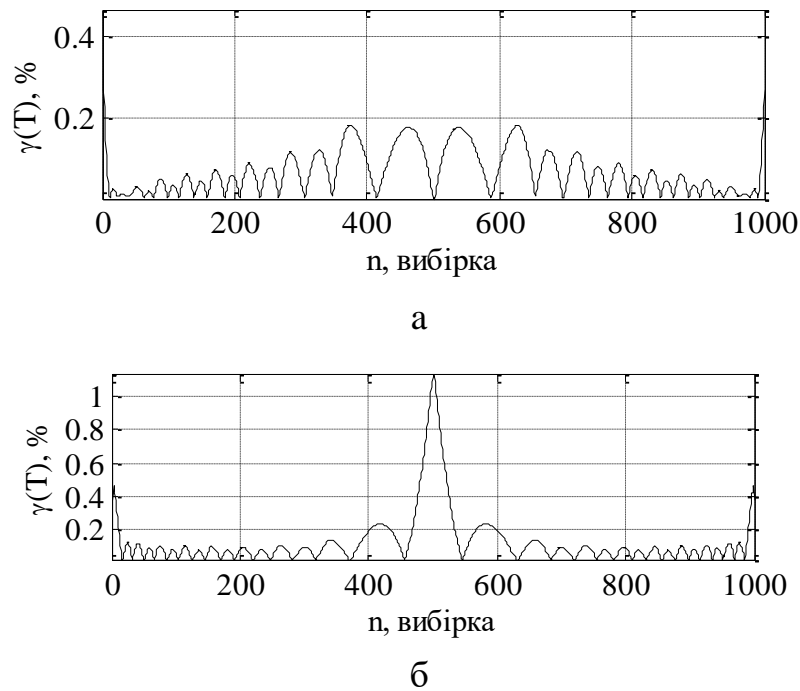


Рис. 3.37. Зведена похибка реконструкції профілю сферичної поверхні для 500-го рядка (а) для 50-го рядка (б) інтерферограми

Як видно з графіків, найбільші значення похибок реконструкції мають місце на краях та в центрі інтерферометричної картини і не перевищують 1,5 %, що є задовільним результатом в оптичних вимірюваннях. Результати реконструкції профілю за методом оцінки миттєвих значень фази і повної фази із логарифмованої комплексної інтерферограми є подібні, але реалізація останнього методу є порівняно простіша.

### Висновки до 3 розділу

1. Реконструкція профілю, а тим паче топології поверхні, із інтерферограми білого світла є складною обчислювальною задачею і може ефективно реалізовуватися лише комп'ютерними засобами. У цьому розділі розроблено нові і вдосконалено відомі методи реконструкції профілю поверхні, досліджено їх обчислювальну ефективність і точність.
2. Вдосконалено та досліджено метод реконструкції профілю поверхні із повної фази сигналу інтерферограми білого світла. Для забезпечення інваріантності до впливу огинаючої амплітуди застосовано нормалізацію сигналу інтерферограми, шляхом ділення інтенсивності поточних пікселів на оцінку огинаючої амплітуди в цій точці. Для оцінювання огинаючої

- амплітуди застосовано метод інтерполяції екстремальних значень сигналу інтерферограми. Вирішено проблему багатозначності та невизначеності знаку функції арккосинус, що дало змогу коректно відновити повну фазу сигналу інтерферограми. Метод забезпечує найвищу точність реконструкції ( $\sigma_\gamma=0,03\%$ ), та досить високу обчислювальну ефективність (36 д+м/піксель).
3. Вперше розроблено та досліджено метод посегментної апроксимації, зміст якого полягає у оберненні функції перетворення інтерферометра білого світла, розбитті сигналу інтерферограми на монотонні сегменти і застосуванні поліноміальної апроксимації до сегментів. Коефіцієнти поліному визначаються на етапі калібрування вимірювального каналу інтерферометра. Метод забезпечує найвищу обчислювальну ефективність (6 д+м/піксель) і досить високу точність реконструкції ( $\sigma_\gamma=0,2\%$ ).
  4. Вперше розроблено та досліджено метод реконструкції профілю поверхні на основі моделі Проні. Для забезпечення сумісності сигналу інтерферограми білого світла із базою розкладу моделі Проні у вигляді комплексних експонент, застосовано апроксимацію огинаючої амплітуди інтерферограми косинусним вікном Блемана-Харіса. Обґрунтовано можливість використання моделі Проні 2-го порядку, що поєднує точність і обчислювальну ефективність реконструкції. Результати досліджень показали задовільні результати щодо точності реконструкції профілю ( $\sigma_\gamma=1,0\%$ ) та обчислювальної ефективності (88 м+д/піксель).
  5. Проаналізовано можливість застосування моделі аналітичного сигналу до інтерферограми білого світла. Виявлено обмеження точності дискретного перетворення Гільберта стосовно інтерферограми сферичної поверхні, що проявляється у накладанні у області нижніх частот спектрів несучої та огинаючої сигналу інтенсивності. Встановлено, що обчислювальна ефективність методів, що базуються на дискретному перетворенні Гільберта, істотно нижча від згаданих вище методів опрацювання сигналів інтерферограми у просторовій області – кількість операцій додавань і множень для реконструкції одного пікселя поверхні складає 1600, причому

існує можливість розпаралелення лише по рядках. При цьому середньоквадратична похибка визначення інформативного параметра із огинаючої сигналу інтенсивності інтерферограми сферичної поверхні складає:

- метод реконструкції із оцінки за Гільбертом огинаючої амплітуди сигналу інтенсивності -  $\sigma_{\gamma}=12\%$ ;
- метод реконструкції із фази сигналу інтенсивності, унормованого за допомогою оцінки за Гільбертом огинаючої амплітуди -  $\sigma_{\gamma}=2,2\%$ ;
- метод реконструкції із миттєвої фази аналітичного сигналу інтенсивності -  $\sigma_{\gamma}=0,4\%$ ;
- метод реконструкції із логарифмованого аналітичного сигналу показав аналогічну із попереднім методом точність -  $\sigma_{\gamma}=0,4\%$ , але дещо вищу обчислювальну ефективність – 1569 д+м/піксель.

## РОЗДІЛ 4

# ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ТА ЇХ ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ НА СУЧАСНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПЛАТФОРМАХ

### 4.1. Адаптація розроблених методів до реконструкції топології поверхні із двовимірного масиву даних та їх порівняльна характеристика

Згідно із опрацьованою у розділі 2 методикою дисертаційних досліджень найперше розроблялися і досліджувалися властивості різних методів реконструкції профілю поверхні (простіші задачі розмірності 2D). На наступному кроці потрібно розширити функціональні можливості розроблених методів, тобто адаптувати їх до задач реконструкції топології поверхні (розмірність 3D).

Ключовим моментом цієї адаптації є процедура розгортання фази („phase unwrapping“), яка повинна виконуватися у двох напрямках ( $x$  та  $y$ ) [82,76]. Таким чином, спочатку розгортаємо фазу по рядках, а потім по стовпцях інтерферограми. Верифікацію цього підходу досліджено на двох методах, які забезпечують найвищу точність реконструкції профілю поверхні і представляють різні групи: один із опрацюванням у просторовій області, а інший - у частотній.

Візуально складно оцінити точність реконструкції топології поверхні із її зображення, тому на рис. 4.1 та 4.2 представлені абсолютні похибки відтворення висоти поверхні, що відповідає кожній точці інтерферограми.

На рис. 4.1 подано абсолютні похибки реконструкції топології поверхонь із інтерферометричного зображення методом нормалізації несучої частоти інтерферограми за використання інтерпольованої огинаючої амплітуди. Для лінійної поверхні похибки не перевищують 1 нм і мають як додатні, так і від’ємні значення. У випадку сферичної поверхні найнижча точність відтворення спостерігається у центрі – похибки не перевищують 20 нм і мають від’ємний знак.

На рис. 4.2 зображена реконструйовані лінійна та сферична поверхні за методом визначення фази інтерферограми із уявної частини прологарифмованого аналітичного сигналу інтенсивності.

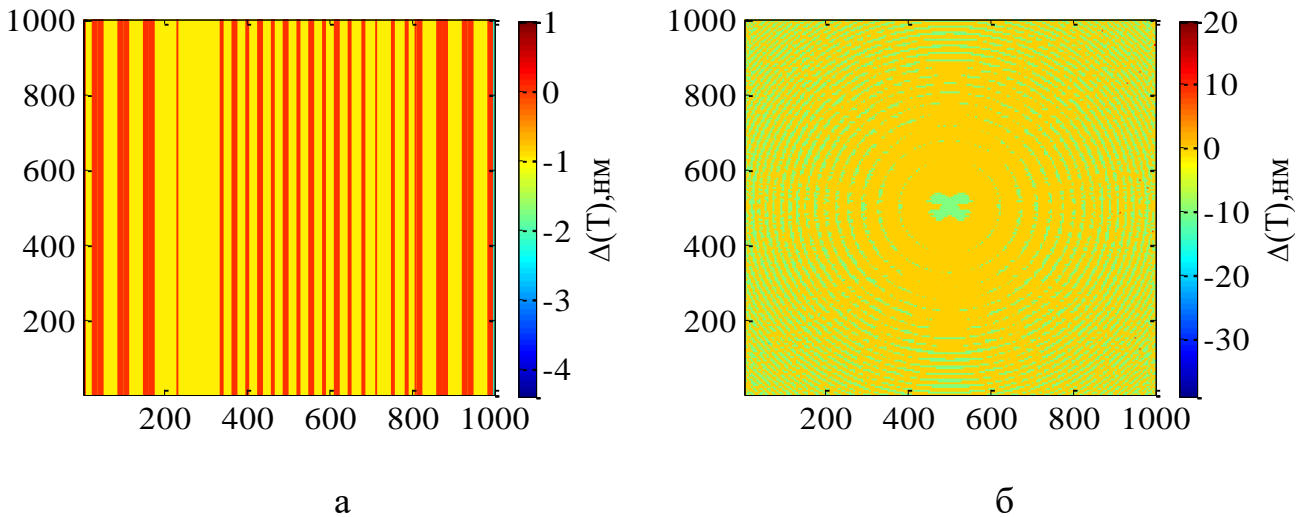


Рис. 4.1. Абсолютні похибки реконструкції топології лінійної (а) та сферичної (б) поверхонь методом нормалізації несучої частоти інтерферограми за використання інтерпольованої огинаючої амплітуди

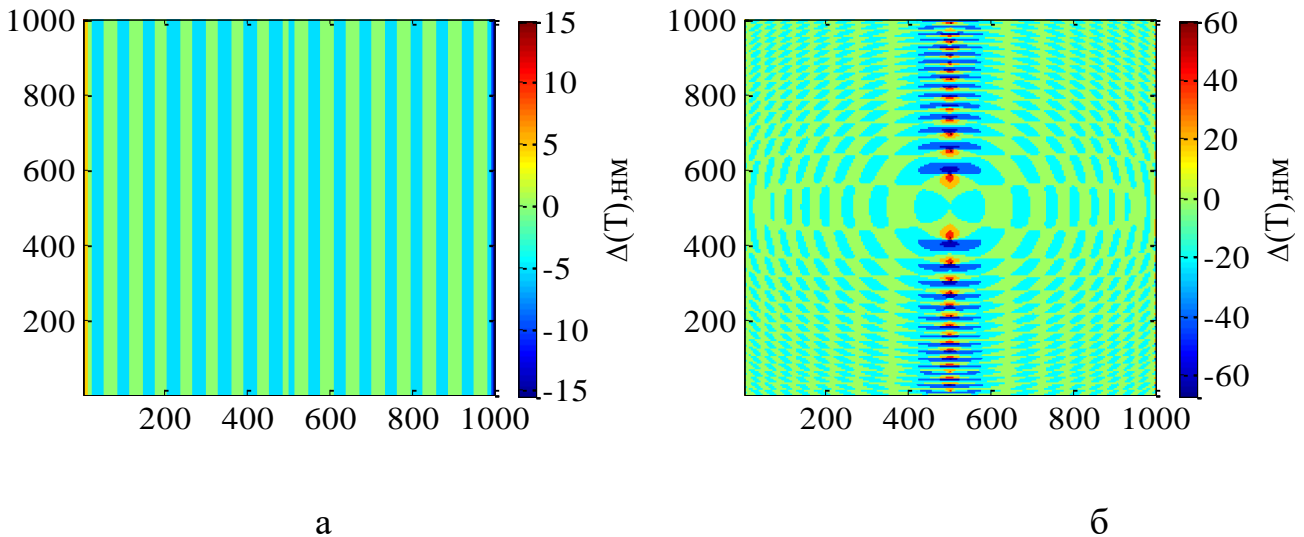


Рис. 4.2. Абсолютні похибки реконструкції топології лінійної (а) та сферичної (б) поверхонь із логарифмованого аналітичного сигналу

Для лінійної поверхні похибки не перевищують 5 нм і мають як додатні, так і від'ємні значення. У випадку сферичної поверхні похибки мають коливний характер та пов'язані із періодом інтерферограми, а їх значення коливаються у діапазоні  $\pm 50$  нм. Найнижча точність відтворення спостерігається на ділянках центральної частини.

На основі наведених досліджень, можна стверджувати про придатність розроблених методів для реконструкції не лише профілю, але і топології поверхонь із однієї інтерферометричної картини.

За результатами виконаних досліджень у таблиці 4.1 подано порівняльну характеристику розроблених методів.

Таблиця 4.1

### Порівняльна характеристика методів реконструкції топології поверхні

Метод	Область опрацювання	Обчислювальна ефективність, (д+м)/піксель	Точність, $\sigma_\gamma$ %	Інваріантність до кривизни	Розпаралелення
ПА	Пр	6	0,2	висока	по точках
НІ	Пр	36	0,03	висока	по рядках
МП	Пр	88	1,0	середня	по точках
ЛА	ПрЧаст	1569	0,4	середня	по рядках
НГ	ПрЧаст	1600	0,4	середня	по рядках

#### 4.2. Високоєфективний метод підвищення ентропії інтерферограм білого світла

Основною метою етапу попередньої обробки, що виконується спецпроцесором оброблення кадрів, є зменшення обсягу даних, які будуть передані на наступну стадію обробки в спецпроцесорі реконструкції топології поверхні. У роботі запропоновано новий високошвидкісний метод прорідження кадрів. Його суть полягає у відборі із послідовності інферометричних зображень лише тих, які містять істотні зміни. Іншими словами подібні, корельовані інтерферограми відкидаються.

На рис. 4.3 наведено блок-схему алгоритму, який є імплементацією методу прорідження кадрів.

Перший захоплений із камери кадр записується у пам'ять обчислювального пристрою як опорне чорно-біле зображення  $M_{REF}$ . Найстарший ( $2^7$ ) біт кожного пікселя цього зображення  $R_{REF}$  записується у відповідну комірку першого реєстру процесора. Отже реєстр міститиме бінаризовану версію опорного чорно-білого зображення  $M_{REF}$ .

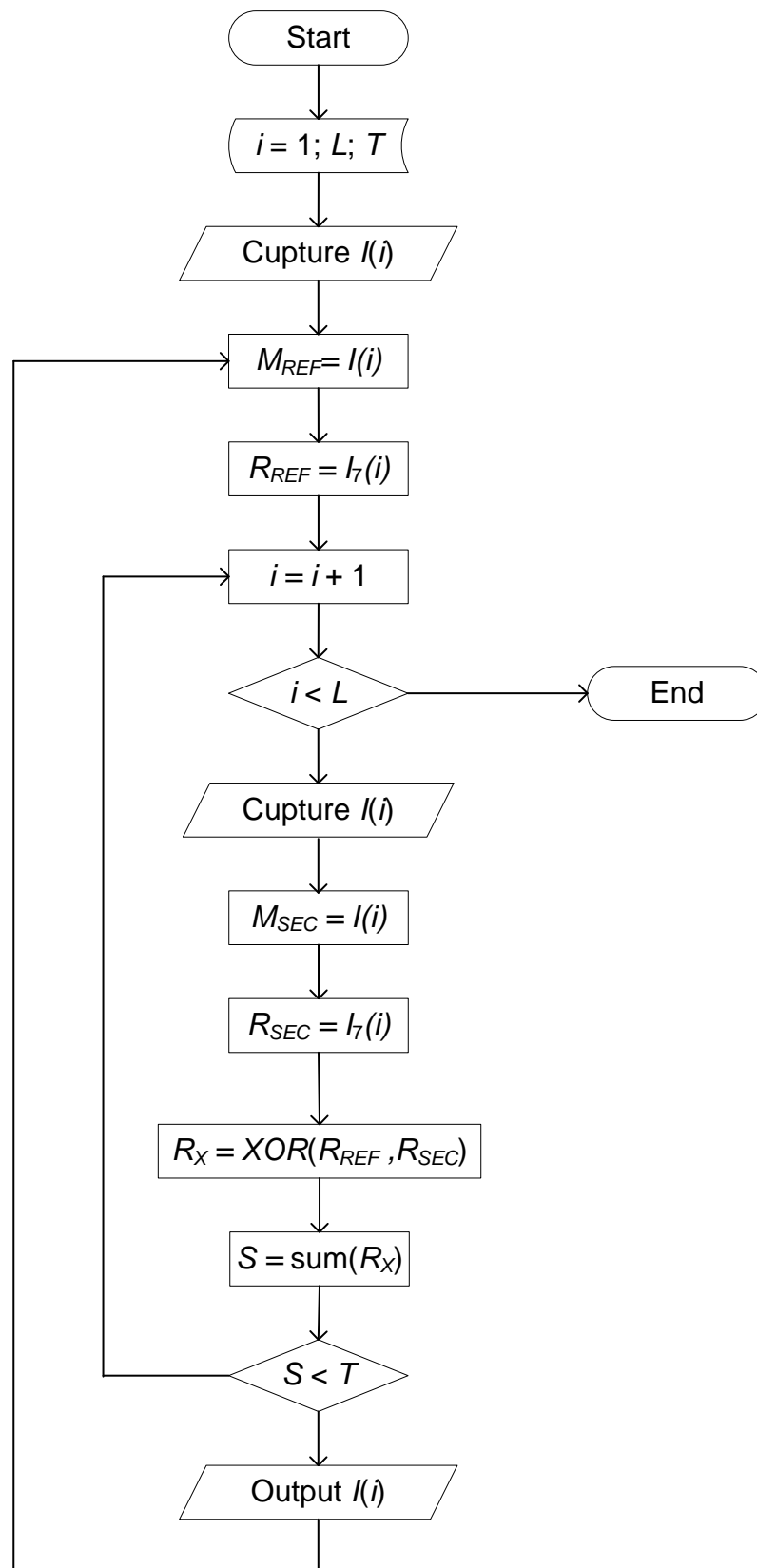


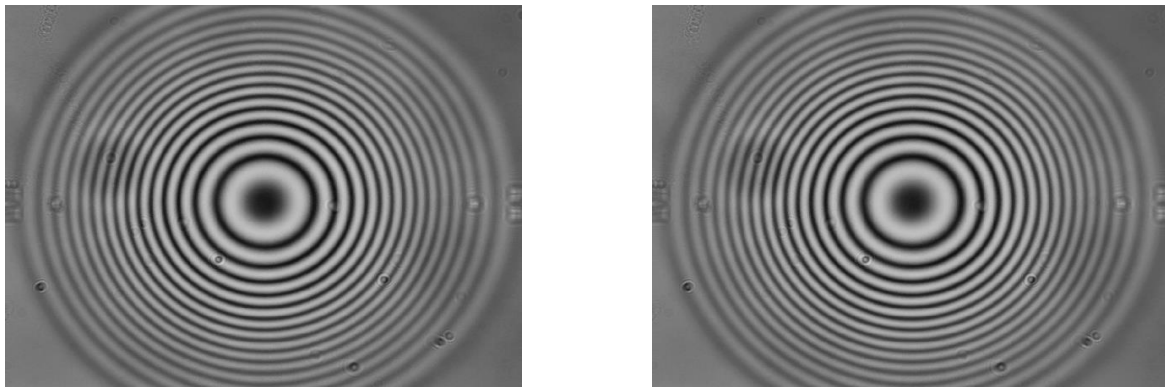
Рис. 4.3. Блок-схема алгоритму прорідження кадрів

Далі захоплюється наступне  $i=i+1$  зображення камери і записується у пам'ять  $M_{SEC}$ , а найстарші біти його пікселів  $R_{SEC}$  - у комірки другого реєстру процесора. Процесор виконує логічну операцію XOR над операндами першого і другого

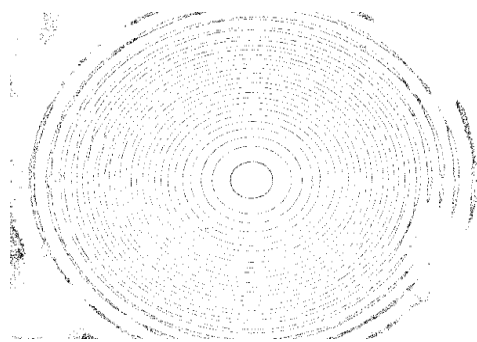


реєстру, а результат цієї операції як різниця бінаризованих зображень записується у реєстрі  $R_X$ . Після виконується підрахунок кількості логічних одиниць у реєстрі  $R_X$ , і якщо їх кількість перевищує заданий поріг  $T$  (наприклад, 2 % від загального числа пікселів зображення), то зображення передається для подальшого оброблення і водночас записується у пам'ять як оновлене опорне. За не перевищення порогу, зображення відкидається і записується наступне із послідовності кадрів.

У додатку Б.2 наведено приклад імплементації алгоритму прорідження кадрів в програмному пакеті MatLab. На рис. 4.4 і 4.5 наведено приклади роботи цього алгоритму на реальних даних.

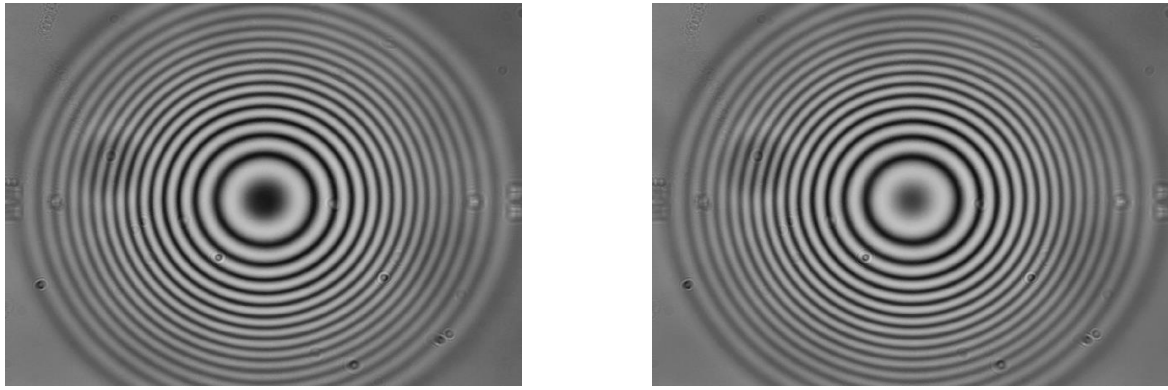


а

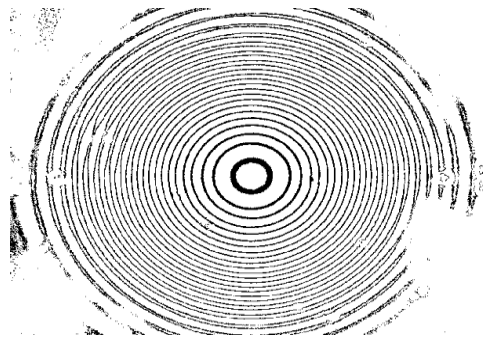


б

Рис. 4.4. Чорно-білі зображення (а) та інвертована різниця на 2,6 % їх бінаризованих версій (б)



а



б

Рис. 4.5. Чорно-білі зображення (а) та інвертована різниця на 15,7 % їх бінаризованих версій (б)

Оскільки, в основі методу лежить логічна операція XOR над найстаршими бітами чорно-білих інтерферометричних зображень, це забезпечує високу ефективність обчислень, що важливо для роботи комп'ютерної системи інтерферометрії білого світла.

#### 4.3. Дослідження методів знешумлення інтерферограми білого світла

На практиці реально виміряні інтерферограми зазнають спотворення внаслідок впливу шумів. Тому з метою підвищення точності перш ніж застосувати розроблені вище алгоритми реконструкції поверхні потрібно знешумити результати вимірювання. Оскільки вимірювальні дані представлені в числовому вигляді, то найкраще для вирішення поставленої задачі підходять різного роду цифрові фільтри або вейвлет-перетворення. Зазвичай більшість методів фільтрації призначені для одновимірних масивів вимірювальних даних. Тому спочатку

проведемо дослідження ефективності фільтрації для одного рядка інтерферограми (2-D випадок), а потім здійсимо адаптацію алгоритмів знешумлення для всієї інтерферограми (3-D випадок).

Оскільки завданням роботи є лише дослідження ефективності методів знешумлення інтерферограм, доцільно застосувати методику, що базується на формуванні інтерферограми із відомими параметрами і накладанні випадкового просторового шуму із нормальним розподілом. Дослідження проведено у програмному пакеті MATLAB, який має розбудовану бібліотеку спеціалізованих функцій синтезу і аналізу сигналів.

Ефективність знешумлення інтерферограми досліджуваними методами кількісно оцінювалася за відношенням сигнал/шум:

$$SNR = 10 \lg \frac{I_{orig}^2}{(I_{orig} - I_{denoised})^2} \quad (4.1)$$

де SNR (signal-to-noise ratio) - відношення сигнал/шум в дБ;

$I_{orig}$ ,  $I_{denoised}$  – відповідно інтенсивність синтезованого (не зашумленого) та знешумленого сигналів інтерферограми.

#### **4.3.1. Знешумлення сигналу інтенсивності інтерферограми за допомогою нерекурсивних фільтрів**

Існує два принципові різновиди цифрових фільтрів: рекурсивні та нерекурсивні [83]. Спектр сигналу інтерферограми розподілений в широкому діапазоні частот, тому для фільтрування доцільно використати нерекурсивні фільтри, які на відміну від рекурсивних характеризуються лінійною фазовою характеристикою. Крім того, використання нерекурсивних фільтрів автоматично виключає проблеми пов'язані із втратою стійкості [56,77].

На рис. 4.6 наведено зашумлений сигнал центрального рядка інтерферограми. Дослідження проводитимуться на інтерферограмі одержаній на сферичній поверхні, оскільки її сигнал має складнішу форму і більш широкий спектр. Відтак його складніше буде відфільтрувати, ніж сигнал одержаний на лінійній поверхні.

Для зашумлення сигналу використовувався вбудований генератор білого шуму у MATLAB – функція `awgn(*)`. Параметри шуму наступні:

- математичне сподівання – 0;
- дисперсія – 0,01;
- відношення сигнал/шум: – 30 дБ.

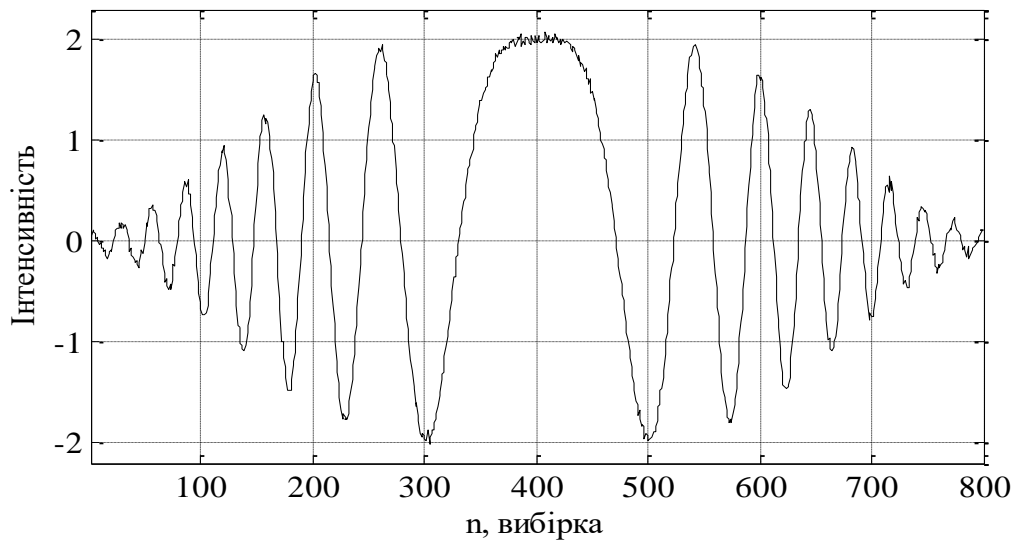


Рис. 4.6. Зашумлений сигнал центрального рядка інтерферограми

Для розрахунку параметрів фільтра необхідно проаналізувати спектр сигналу (рис 4.7). Для випадкових сигналів для оцінки частотного складу застосовують спектральну густину потужності, яка розраховується за допомогою спеціальної функції MATLAB `psd(*)`.

Як видно з рисунку, корисний сигнал зосереджено в смузі від 0 до 0,08. В діапазоні вище 0,08 сигнал зумовлений в основному шумами, рівень яких становить близько 30 дБ. На основі аналізу рис. 3.15 було обрано такі параметри фільтра:

- тип фільтра – ФНЧ;
- порядок – 15;
- смуга пропускання – 0-0,08.

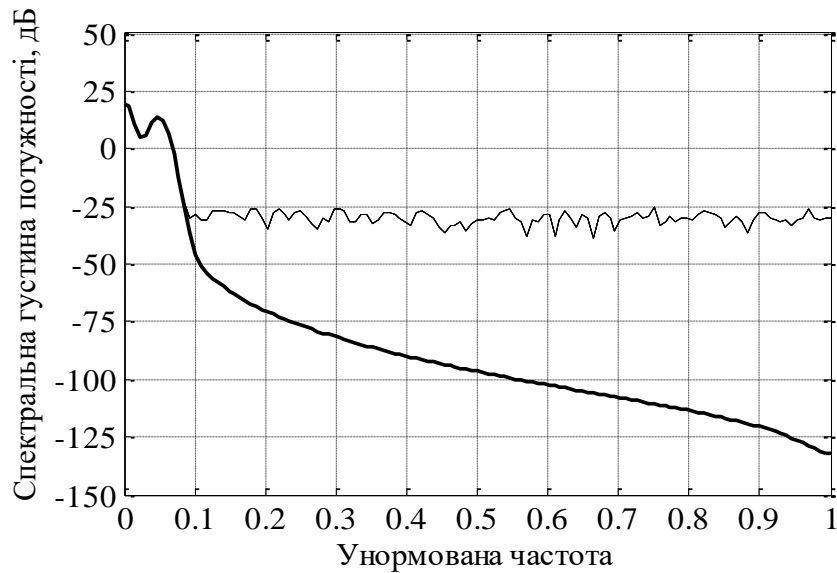


Рис. 4.7. Спектр оригінальної (потовщена лінія) та зашумленої (суцільна лінія) сигналів інтерферограми

Для розрахунку параметрів нерекурсивного фільтра використано спеціальну функцію MATLAB `remez(*)`. Ця функція обчислює коефіцієнти фільтра таким чином, щоб середньоквадратичне відхилення між реальною і ідеальною передатною характеристикою фільтра заданого порядку було мінімальним (рис 4.8).

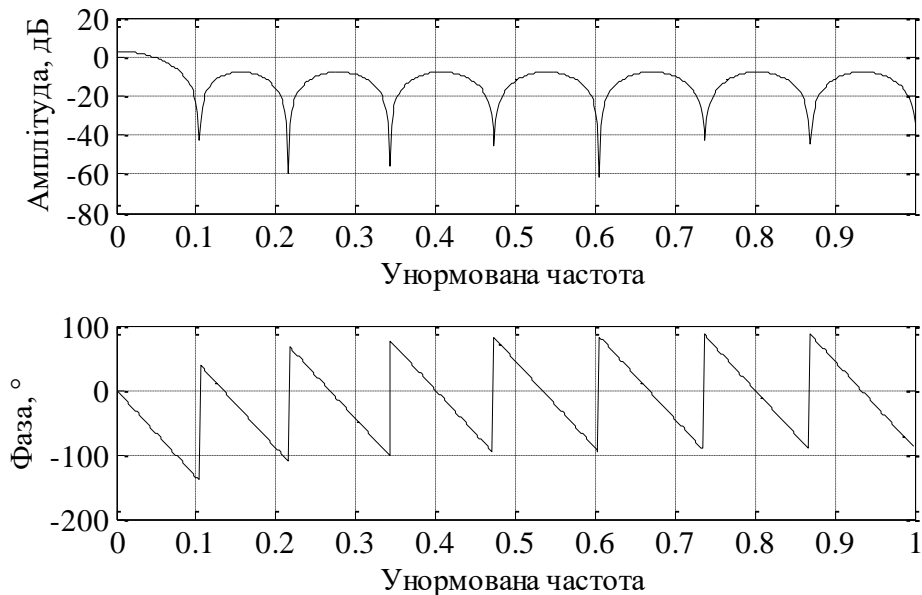
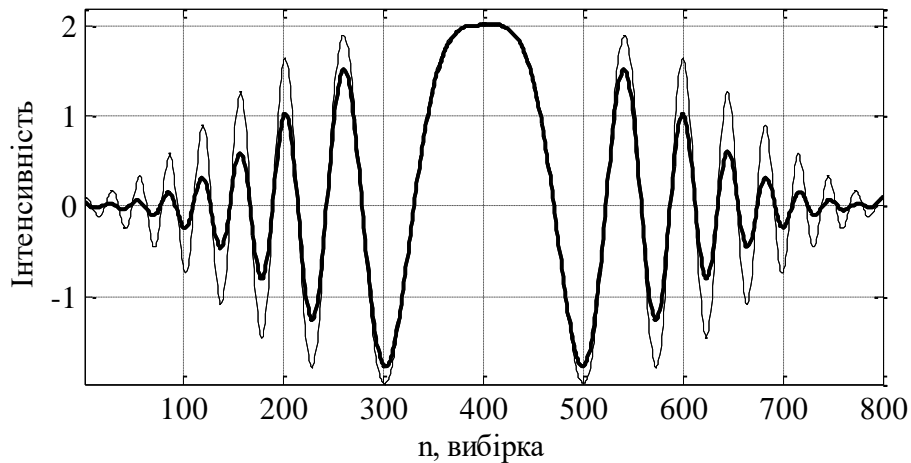


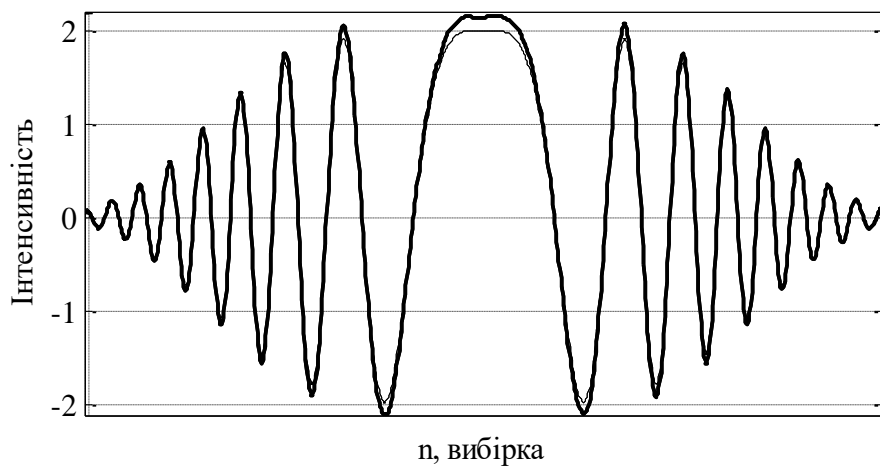
Рис. 4.8. АЧХ та ФЧХ нерекурсивного фільтра

Результати використання фільтра для знешумлення наведено на рис. 4.9, а. Як видно, шуми на відфільтрованому сигналі практично відсутні. Але разом з тим

спостерігається побічний паразитний ефект: в центрі оригінальний і знесумлений сигнал практично збігаються, проте на краях спостерігається суттєве відхилення. Дане явище зумовлене тим, що частина корисного сигналу зосереджена поза межами смуги пропускання фільтра.



а



б

Рис. 4.9. Оригінальний та відфільтрований (потовщена лінія) сигнали зі смугою пропускання: а  $-0,08$ ; б  $-0,18$

З метою запобігання спотворень форми відфільтрованого сигналу, доцільно розширити смугу пропускання фільтра з  $0,08$  до  $0,18$ . Результати фільтрування після розширення смуги наведено на рис. 4.9, б. Як видно з графіків, відфільтрований сигнал не зазнав суттєвих спотворень. Проте на ньому спостерігаються деякі артефакти (особливо в центрі). Причиною є те, що корисний сигнал лежить частково у області частот, де домінують шуми. Тому розширення смуги пропускання фільтра призводить до низького придушення шумів.

### 4.3.2. Знешумлення сигналу інтенсивності інтерферограми за допомогою вейвлет-перетворення

При вейвлет аналізі сигнал розкладають на апроксимуючі коефіцієнти  $cA_j$ , які представляють згладжений сигнал, і деталізуючі коефіцієнти  $cD_j$ , які описують його флуктуації [84]. Очевидно, шумова компонента більше відображається у деталізуючих коефіцієнтах  $cD_j$ . Тому при видаленні шуму обробляються переважно деталізуючі коефіцієнти [85]. Друге припущення полягає в тому, що рівень шумової компоненти менший, ніж корисний сигнал. Тому найпростіший спосіб видалення шуму – це зробити нульовими значення коефіцієнтів, які менші певного порогового рівня [86]. Ця процедура називається порогуванням (англ. *thresholding*) коефіцієнтів. Широке розповсюдження отримали методи так званого жорсткого і м'якого порогування.

За жорсткого порогування зберігаються незмінними всі коефіцієнти, що дорівнюють або більші за абсолютне значення порогу  $\tau$ , а менші коефіцієнти прирівнюються до нуля, при м'якій пороговій обробці поряд з онуленням коефіцієнтів, що менші за модулем від  $\tau$ , решта коефіцієнтів зменшуються на  $\tau$ .

При вирішенні задачі очищення сигналу від шуму з допомогою вейвлет перетворення необхідно:

- оцінити спектральний склад шумової компоненти;
- вибрати тип порогового опрацювання;
- визначити критерій розрахунку самого порогу.

Від вибору порогового рівня шуму залежить якість придушення шуму: при малих значеннях порогу зберігається фон у деталізуючих коефіцієнтах і тому відношення сигнал/шум збільшується незначно, а при великих значеннях порогу можна втратити коефіцієнти, які несуть корисну інформацію.

Таким чином, процедура видалення шуму з сигналу складається з трьох кроків:

1. Декомпозиція. Вибирається тип вейвлету і рівень розкладу  $N$  і здійснюється обчислення коефіцієнтів.

2. Порогова обробка деталізуючих коефіцієнтів. Для кожного рівня від 1 до  $N$  вибирається поріг і застосовується м'яка або жорстка порогова обробка деталізуючих коефіцієнтів.
3. Реконструкція. Здійснюється вейвлет реконструкція, що базується на коефіцієнтах апроксимації рівня  $cA_j$  і модифікованих деталізуючих коефіцієнтах  $cD_j$ .

У пакеті MATLAB є Wavelet Toolbox, що містить функції для вейвлет оброблення сигналів і зображень. Для розкладу (декомпозиції) зашумленого сигналу застосуємо функцію `wavedec(*)`. Ця функція повертає вектор  $C$ , що містить апроксимуючі та деталізуючі коефіцієнти. Для виділення деталізуючих коефіцієнтів використовується функція `detcoef(*)`. Оцінка рівня шуму на кожному рівні розкладу здійснюється за допомогою функції `whoisest(*)`. Ця інформація використовується для виставляння порогу  $\tau_i$  за допомогою функції `thselect(*)`.

Для знешумлення сигналу були вибрані такі параметри вейвлет-перетворення:

- тип вейвлету: `db9`;
- рівень розкладу: `3`;
- критерій порогоування: `'minimaxi'`;
- метод порогоування: м'який.

Базуючись на модифікованих значеннях деталізуючих коефіцієнтів всіх рівнів за допомогою функції `waverec(*)` синтезуємо знешумлений сигнал. Загалом за допомогою вейвлет перетворення досягаються кращі результати, ніж за використання цифрових фільтрів. Шумова складова практично повністю відфільтрована, а корисний сигнал не зазнає спотворень (відношення сигнал/шум підвищено майже на 35 дБ). Візуально складно розрізнити оригінальний і знешумлений сигнал, тому на рис 4.10 представлена різниця інтенсивностей оригінального і зашумленого сигналу (рис. 4.10,а), а також оригінального і відфільтрованого (рис. 4.10,б). Враховуючи задовільні результати знешумлення,



доцільно здійснити адаптацію вейвлет-перетворення для фільтрації двовимірного масиву даних.

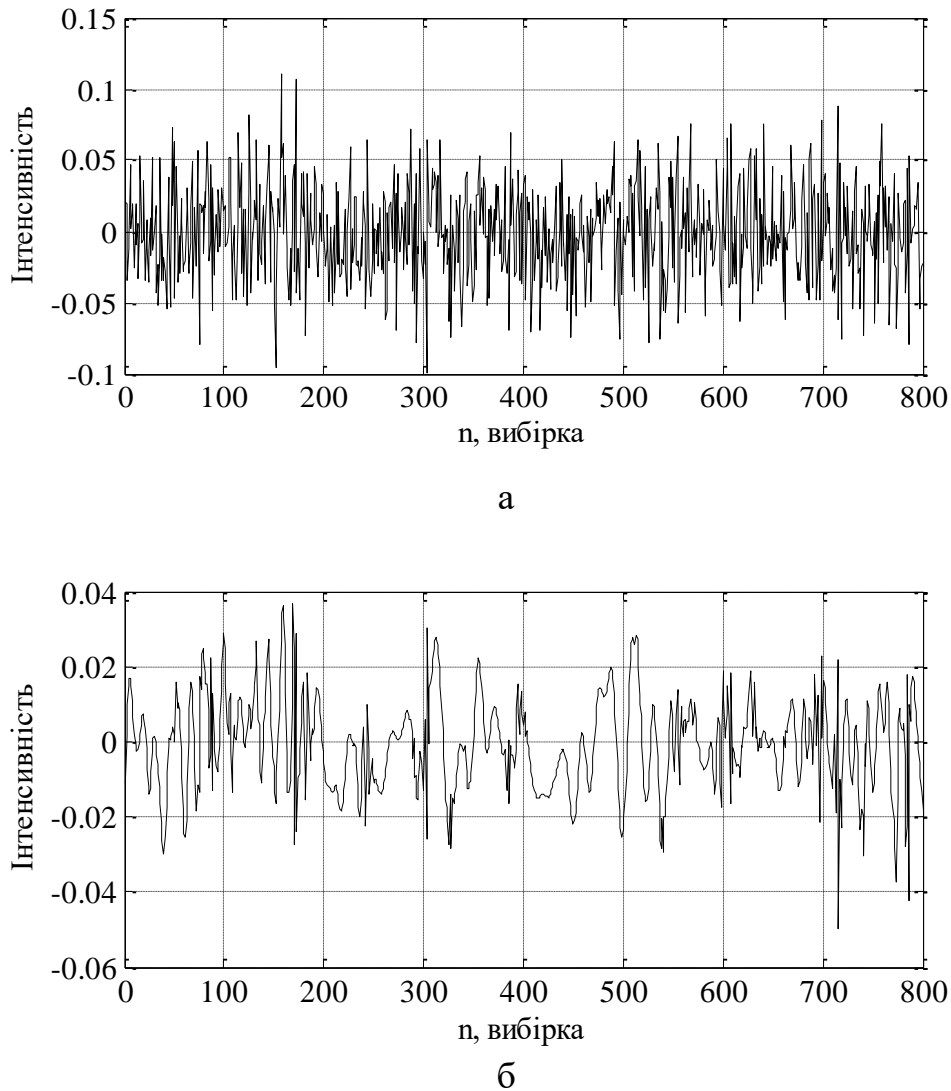


Рис. 4.10. Різниця між оригінальним і зашумленим сигналом (а) та відфільтрованим з допомогою вейвлет-перетворення (б)

#### 4.3.3. Знешумлення інтерферометричного зображення за допомогою вейвлет-перетворення

Інтерферограму можна вважати двовимірним сигналом. Алгоритм розкладу зображення аналогічний тому, що застосовується в одновимірному випадку. Але у випадку двовимірного сигналу деталізуючі коефіцієнти  $cD_j$  містять три групи: горизонтальну  $cH_j$ , вертикальну  $cV_j$  та діагональну  $cD_j$ . В реальних зображеннях найбільше інформації зосереджено в апроксимуючій складовій, представленій коефіцієнтами  $cA_j$ , що по суті є нечіткою версією оригінального зображення. Цей

факт можна використати до знешумлення сигналів, шляхом пороговання деталізуючих коефіцієнтів різних рівнів і напрямів.

Як і у випадку одновимірного сигналу, для вилучення шумової складової спершу необхідно здійснити пороговання деталізуючих коефіцієнтів. Для декомпозиції зображення використовується функція `wavedec2(*)`. Зворотний вектор  $C$  містить коефіцієнти вейвлет-перетворення у такому форматі:

$$C = A_N \quad H_N \quad V_N \quad D_N \quad H_{N-1} \quad \dots \quad H_1 \quad V_1 \quad D_1 \quad (4.2)$$

де  $A_N$  – апроксимуючі коефіцієнти рівня  $N$ ;

$H_N$  – деталізуючі горизонтальні коефіцієнти;

$V_N$  – деталізуючі вертикальні коефіцієнти;

$D_N$  – деталізуючі діагональні коефіцієнти.

Функція `detcoef2(*)` виділяє деталізуючі горизонтальні, вертикальні і діагональні коефіцієнти двовимірного сигналу заданого рівня  $N$ . Для оцінки рівня шуму на кожному рівні та напрямі декомпозиції зображення використовується медіанний метод [87]. Далі будуємо матрицю порогів  $\tau_{i,j}$  із урахуванням рівнів шуму та ваги відповідних коефіцієнтів для відновлення сигналу. Порогування коефіцієнтів здійснюється аналогічно, як і в підпункті 4.3.2 за методом м'якого пороговання. Базуючись на модифікованих значеннях деталізуючих коефіцієнтів всіх рівнів за допомогою функції `wdencmp(*)` синтезуємо знешумлений сигнал.

Результати знешумлення інтерферограми з допомогою вейвлет перетворення представлено на рис. 4.11, як різницю між оригінальним зображенням інтерферограми та знешумленим. Параметри шуму, як і параметри вейвлет-перетворення приймаються ідентичні до пункту 4.3.2. Слід зауважити, що використання вейвлет-перетворення дозволяє суттєво покращити якість зображення інтерферограми порівняно з вхідними даними. Але в порівнянні з одновимірними даними, якість знешумлення дещо нижча. Це пов'язано з тим, що для одновимірного масиву можна точніше налаштувати пороговий рівень.

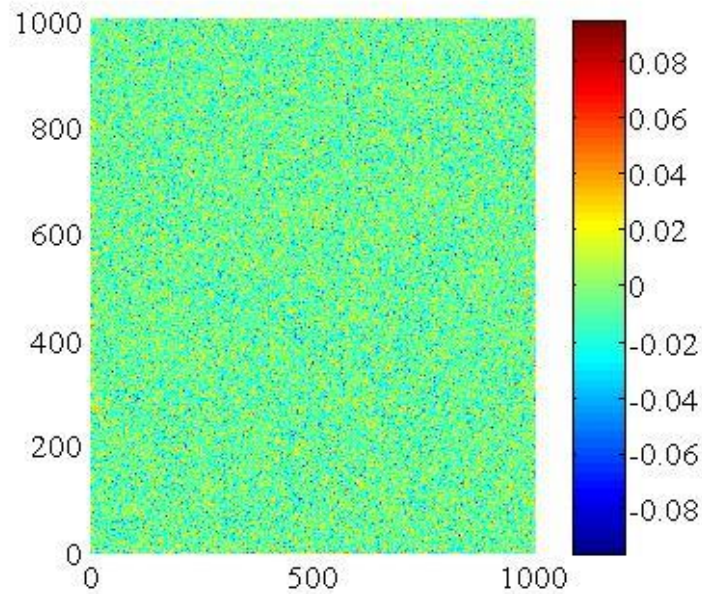


Рис. 4.11. Різниця між ориганільним та знешумленим зображеннями інтерферограми.

За результатами досліджень можна зробити висновок про ефективність знешумлення інтерферограм складних нелінійних поверхонь за допомогою вейвлет-перетворення і рекомендувати цей інструмент цифрового оброблення сигналів для придушення шумів у інтерферограмах, одержаних із реальних експериментів.

#### **4.4. Експериментальні дослідження розроблених методів на реальних інтерферограмах**

Ефективність розроблених методів також перевірено шляхом реконструкції топології поверхонь із реальних інтерферограм білого світла.

Експериментальні дослідження проведені на устаткуванні Технічного Університету Ільменау (Німеччина). Дослідження проводилися як для лінійної, так і сферичної поверхонь.

Інтерферограми отримано із використанням інтерферометра Майкелсона білого світла із поляризуючою оптикою [88]. Структуру експериментальної інтерферометричної устави зображено (рис. 4.12).

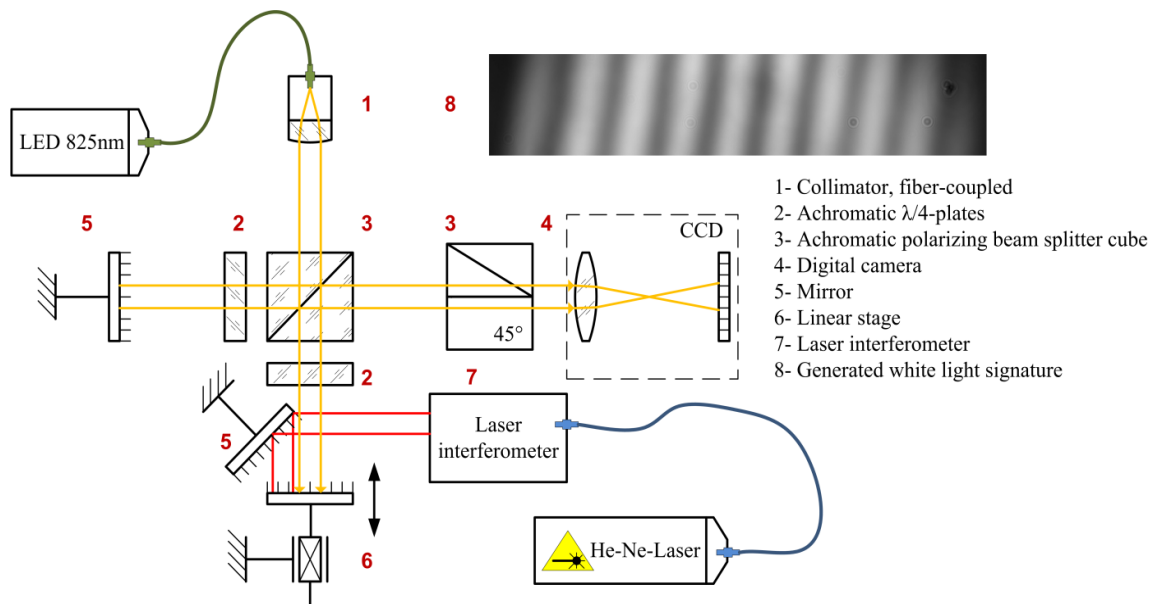


Рис. 4.12. Структура інтерферометричної устави на основі інтерферометра Майкелсона білого світла із поляризуючою оптикою [88]

Інтерферометрична уставка складається із коліматора (подвійного волокна) 1, ахроматичні чверть-хвильові пластини 2, ахроматичний поляризатор і світлоподільник 3, цифрова камера 4, дзеркала 5, лінійна платформа 6, лазерний інтерферометер 7, загальний вигляд інтерферограми білого світла 8.

Зовнішній вигляд експериментальної інтерферометричної устави зображено на рис. 4.13.

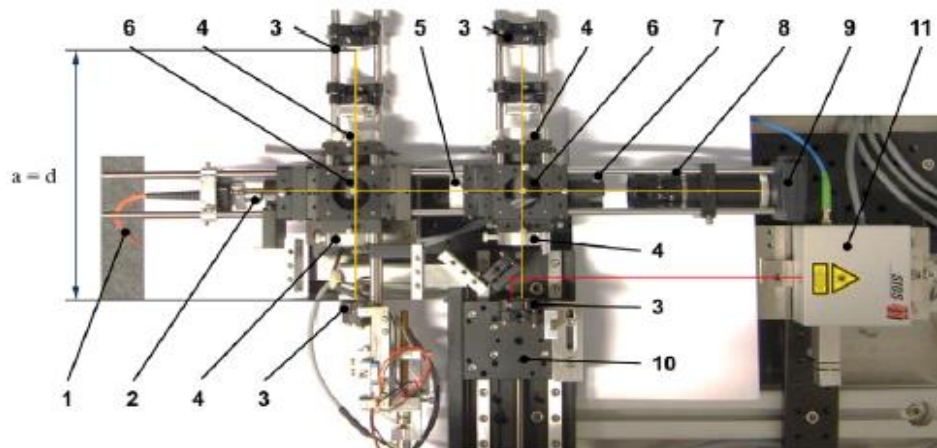


Рис. 4.13. Зовнішній вигляд експериментальної інтерферометричної устави на основі інтерферометра Майкелсона білого світла із поляризуючою оптикою [88]

У якості досліджуваного об'єкту розміщена лінійна поверхня (дзеркало). Вимірювання проводилося із використанням джерела білого світла із центральною

довжиною хвилі 825 нм. Вигляд інтерферометричної картини лінійної поверхні, виміряної і зареєстрованої на CCD-камеру із 1280x1024 пікселами по осях  $x$  та  $y$ , представлено на рис. 4.14.

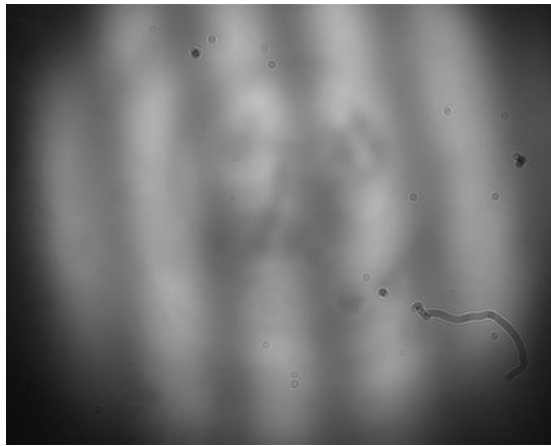


Рис. 4.14. Реальна інтерферограма дзеркала

Як видно на інтерферограмі спостерігаються суттєві оптичні спотворення, які будуть вносити значні похибки в результати визначення топології поверхні. Тому перед виконанням реконструкції необхідно перш за все усунути оптичні дефекти із інтерферометричного зображення.

Було проаналізовано декілька способів зменшення оптичних спотворень інтерферометричних картин. Використання медіанного фільтра усуває оптичні спотворення зображення, але також придушує корисний сигнал. Тому було вирішено усунути дефекти зображення шляхом їх виділення та віднімання із інтерферограми. Для виділення дефектів додатково реєструвалося зображення без інтерферометричних смуг, тобто за такої оптичної різниці ходу променів досліджуваної поверхні та опорного дзеркала, щоб явище інтерференції не виникало (рис. 4.15).

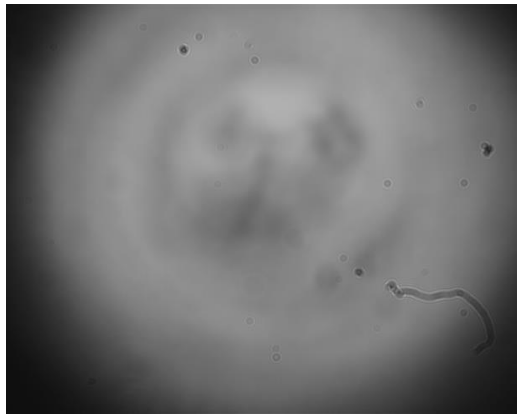
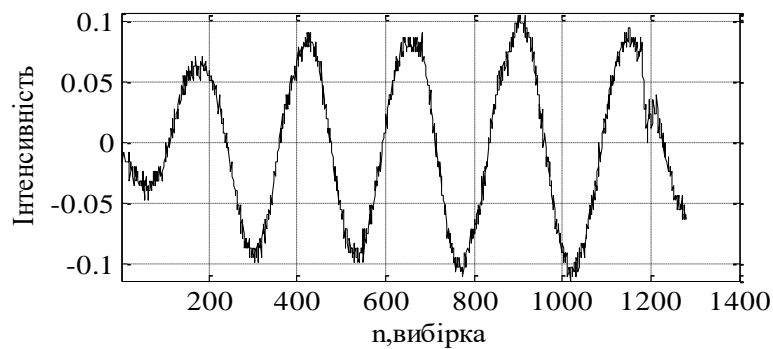
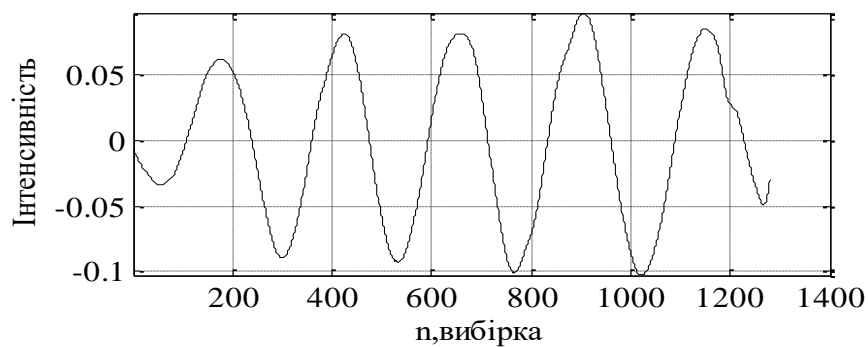


Рис. 4.15. Зареєстроване камерою зображення без інтерферометричних смуг

Після усунення дефектів сигнал інтерферограми все ще спотворений шумами (рис. 4.16, а). Тому додатково використано нерекурсивний фільтр нижніх частот для усунення залишкових шумів. На рис. 4.16, б показано відфільтрований сигнал інтерферограми.



а



б

Рис. 4.16. Результати усунення дефектів оптики (а) та придушення шуму (б)

Далі здійснювалася реконструкція топології поверхні із отриманого сигналу з використанням методу визначення миттєвої фази несучої сигналу інтерферограми (квадратурної демодуляції). Виділялася центральна частина зображення, оскільки

на краях сигнал вже не інформативний. Результати реконструкції лінійної поверхні представлено на рис. 4.17.

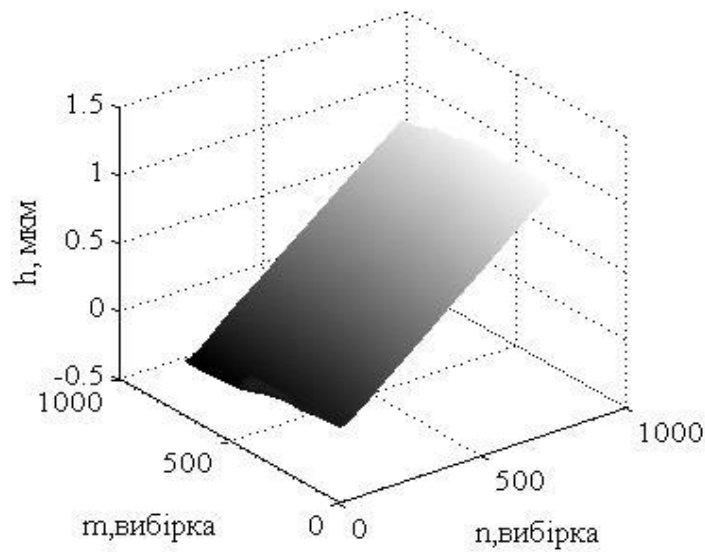


Рис. 4.17. Поверхня реального об'єкту реконструйована із інтерферограми, одержаної в ході експерименту

Також здійснено реконструкцію топології сферичної поверхні із інтерферограми білого світла (рис. 4.18). Інтерферограма отримана на іншому інтерферометрі із іншим джерелом світла, центральна довжина хвилі якого становить 823 нм, а ширина спектру (в шкалі довжин хвиль) 40 нм. Кількість пікселів, як і у попередньому випадку - 1280x1024.

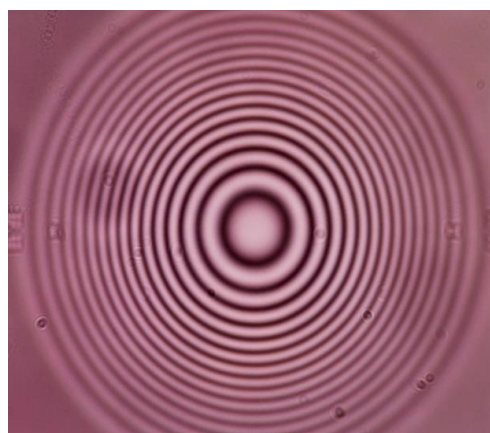


Рис. 4.18. Інтерферограма реальної сферичної поверхні

Додаток Б.3 містить код в програмному пакеті MatLab для реконструкції топології поверхні реального об'єкту, одержаної в ході експериментальних вимірювань.

У випадку інтерферограми сферичної поверхні ми отримуємо кольорове зображення, яке необхідно спочатку перевести в чорно-біле. Це виконується за допомогою вбудованої функції Matlab `rgb2gray(*)`.

Усунення шумів здійснювалося за допомогою вейвлет-перетворення. Параметри вейвлет-перетворення для знешумлення відповідають тим що в п.п. 4.3.2 та 4.3.3.

Реконструкція як і у випадку лінійної поверхні проводилася методом квадратурної демодуляції. Результати реконструкції представлено на рис. 4.19.

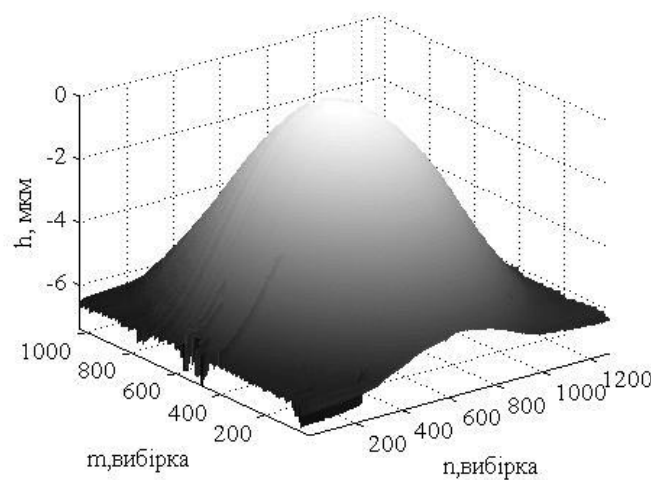


Рис. 4.19. Вигляд сферичної поверхні, реконструйованої із інтерферограми, зареєстрованої на експериментальній устатці

Реконструкція обох поверхонь здійснювалася з використанням методу квадратурної демодуляції. Інші методи дали подібні результати. Результати визначення топології поверхні підтвердили правильність математичної моделі інтерферограми білого світла та підходу до реконструкції профілю і топології поверхні.

Під час виконання експериментальних досліджень не використовувалися еталонні поверхні для калібрування вимірювального каналу інтерферометра, тому немає можливості оцінити і порівняти точність реконструкції розроблених методів.

Достовірність і адекватність прийнятих моделей, а також ефективність розроблених методів підтверджено у ході фізичних експериментів, тому вони можуть застосовуватися для задекларованих цілей, а саме для реконструкції топології поверхні з лише на основі однієї інтерферометричної картини.



#### 4.5. Розроблення та дослідження можливих варіантів апаратної реалізації методів реконструкції топології поверхні

Для ефективної апаратної реалізації розроблених методів необхідно оцінити можливості їх розпаралелення. За цим критерієм можна виділити такі дві групи:

- придатні до розпаралелення по точках (посегментна апроксимація та метод Проні);
- придатні до розпаралелення по рядках (методи на основі інтерполяції та перетворення Гільберта).

Оскільки техніка цифрового опрацювання сигналів завжди пов'язана із великою кількістю обчислень, а у випадку зображень завдання ускладнюється великим обсягом двовимірних даних, то для практичної реалізації таких методів прийнято використовувати спеціалізовані обчислювальні платформи. З технологічної точки зору вони поділяються на три групи [89,90, 91]:

- цифрові сигнальні процесори (англ. Digital Signal Processors – DSP);
- програмовані логічні матриці (англ. Field Programmable Gate Array – FPGA);
- графічні процесори (англ. Graphical Processing Unit – GPU).

##### 4.5.1. Апаратна реалізація спецпроцесора опрацювання кадрів CCD-камери

Сучасні CCD-камери можуть передавати сотні кадрів за секунду [92,93]. Згідно теореми дискретизації, якщо частота кадрів камери складає  $F_S$  кадрів/сек., то є можливість досліджувати процеси, спектр який обмежений частотою

$$F_{MAX} = F_S / 2.$$

Допустимо, що камера передає чорно-білі зображення роздільною здатністю  $8\text{біт} \times 1000 \times 1000$  пікселів, а частота складає 200 кадрів/с, це значить що генерований обсяг даних становить 100 Мбайт/с, причому час опрацювання кожного кадру не повинен перевищувати 10 мс. За потреби опрацювання даних у реальному часі із такими високими вимогами щодо швидкодії спецпроцесор доцільно реалізувати на базі FPGA (рис. 4.20).

Як зазначалося у п. 2.1 завданням спецпроцесора є прорідження кадрів, з метою відбору із потоку лише тих кадрів, які відрізняються між собою на задану кількість пікселів. Швидкий алгоритм прорідження кадрів представлено у п. 4.2. Вибрані кадри містять мультиплікативні спотворення, зумовлені нерівномірністю оптичного каналу інтерферометра. Для їх компенсації у спецпроцесорі реалізовано функцію еквалайзера. Налаштування параметрів еквалайзера відбувається на тестових зображеннях. Крім мультиплікативних, зображення спотворень піддаються впливу адитивних шумів. Враховуючи випадкову природу шумів, доцільно застосувати знешумлення, наприклад за допомогою цифрових фільтрів чи вейвлет-перетворення (п.4.3). Якщо адитивні спотворення мають систематичну складову, доцільно застосувати різницевий спосіб, описаний у п.4.4.

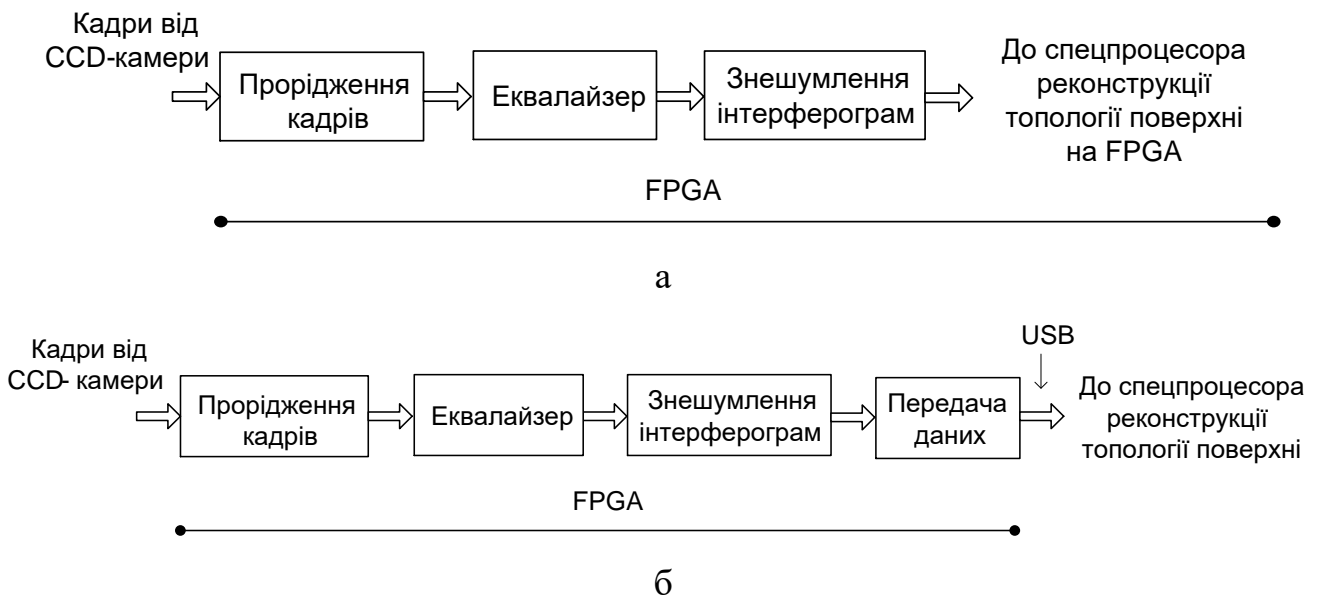


Рис. 4.20. Реалізація спецпроцесора оброблення кадрів на платформі FPGA без (а) та з модулем передачі даних за стандартом USB (б)

Якщо спецпроцесор реконструкції топології поверхні реалізовано не на технології FPGA, а на іншій, наприклад, GPU, то у спецпроцесорі оброблення кадрів на виході доцільно реалізувати модуль передачі даних, наприклад за стандартом USB (рис. 4.20,б).

#### 4.5.2. Приклади апаратної реалізації розроблених методів реконструкції топології поверхні

Враховуючи результати оцінювання обчислювальної ефективності розроблених методів опрацювання інтеферограм, представлених в 3 розділі, а також особливості сучасних обчислювальних засобів, кожен метод доцільно реалізовувати на таких платформах.

Метод на базі моделі Проні доцільно імплементувати на GPU [94]. Це зумовлено тим, що у цьому випадку всі дані розміщуються в одній пам'яті, а це істотно прискорить формування і обчислення матриць Тепліца та передачу даних відповідно. Крім того, цей метод є досить складним в обчислювальному сенсі, а в його основі лежать складні операції, що може призводити до виникнення суттєвих обчислювальних похибок, наприклад, обчислення погано обумовлених матриць. Додатковою перевагою цього методу реконструкції є те, що опрацювання даних вдається розпаралелити по точках, відтак всі пікселі можуть опрацьовуватися незалежно кожен на окремому ядрі GPU (рис. 4.21).

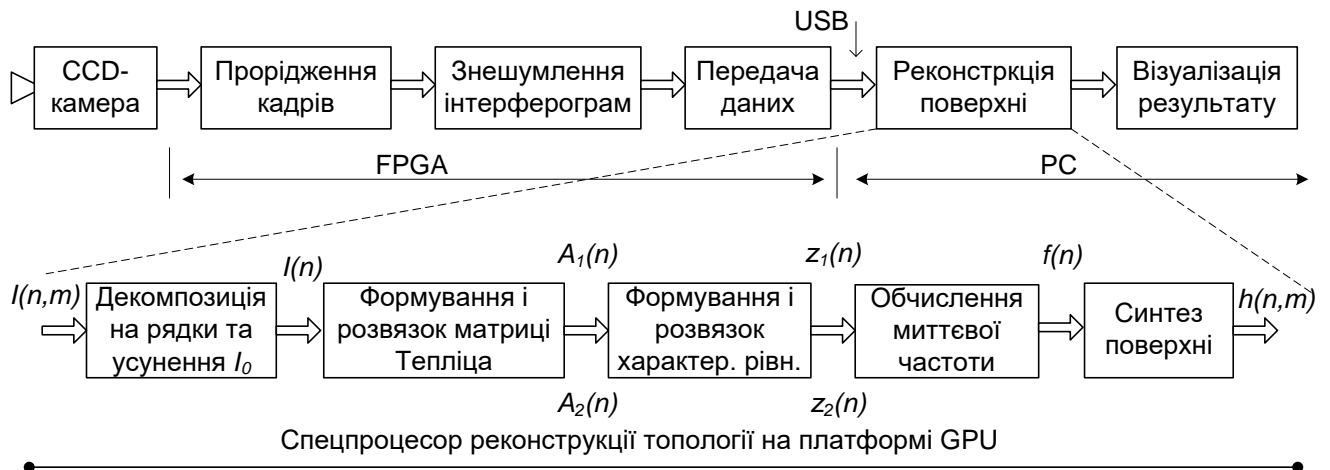


Рис. 4.21. Приклад імплементації методу Проні для реконструкції топології поверхні

Методи на основі перетворення Гільберта доцільно реалізувати на GPU або FPGA, оскільки їх вдається розпаралелити лише порядках. Ці методи є доволі складними з погляду обчислень. Але оскільки в їх основі лежать добре відомий та широко застосовуваний у техніці цифрового оброблення сигналів алгоритм швидкого перетворення Фур'є, для якого є доступними велика кількість

оптимізованих реалізацій, то імплементація методів не буде складною [94-97]. Можлива також реалізація методів на основі перетворення Гільберта на базі DSP, якщо не стоїть вимога опрацювання у реальному часі. На рис. 4.22 наведено приклад реалізації методу логарифмування аналітичного сигналу на платформі FPGA.

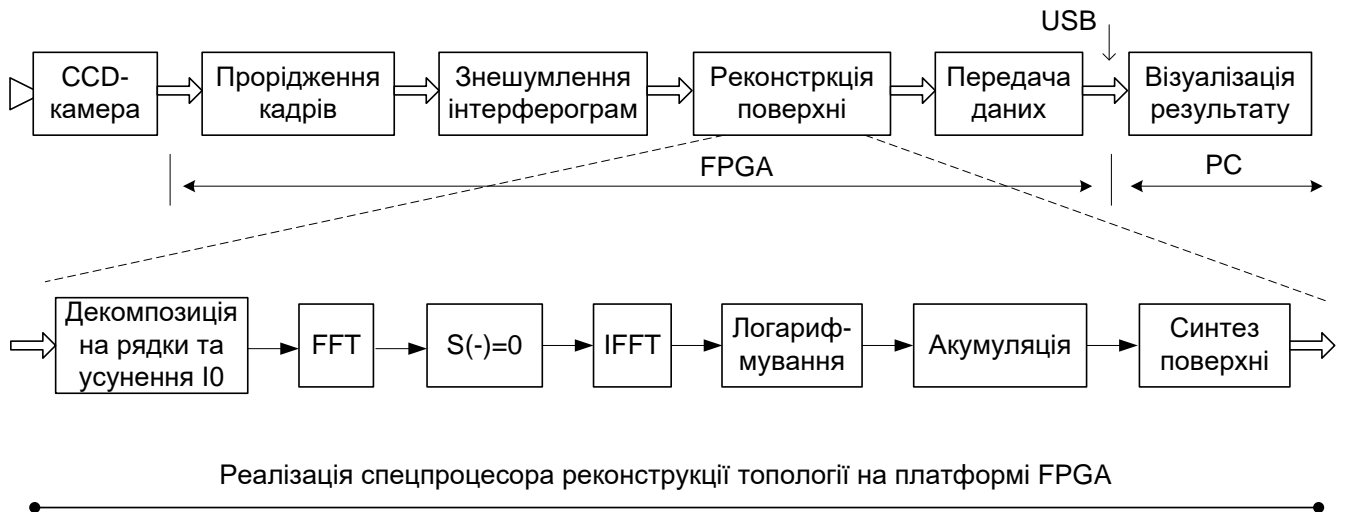


Рис. 4.22. Приклад імплементації методу логарифмування аналітичного сигналу для реконструкції топології поверхні

Методи на основі інтерполяції теж найкраще реалізовувати на GPU або FPGA. Сам метод є обчислювально нескладний і в його основі лежать прості алгоритми, що практично виключає виникнення проблем зумовлених накопичення обчислювальних похибок.

Метод на основі поsegmentної апроксимації можна імплементувати на будь-якій із платформ GPU, FPGA чи DSP. Метод розпаралелюється по точках, і є вкрай простим як з точки зору кількості множень, так і прототипування, бо не містить нелінійних операцій.

У додатку В наведено наведено приклад імплементації (код програми та результат виконання) на платформі FPGA найефективнішого у обчислювальному сенсі алгоритму реконструкції сферичної поверхні за методом поsegmentної апроксимації, що повністю підтверджує результати теоретичних розрахунків. На рис. 4.23 подано фрагмент копії екрану із симуляції цього алгоритму в пакеті Quartus II.

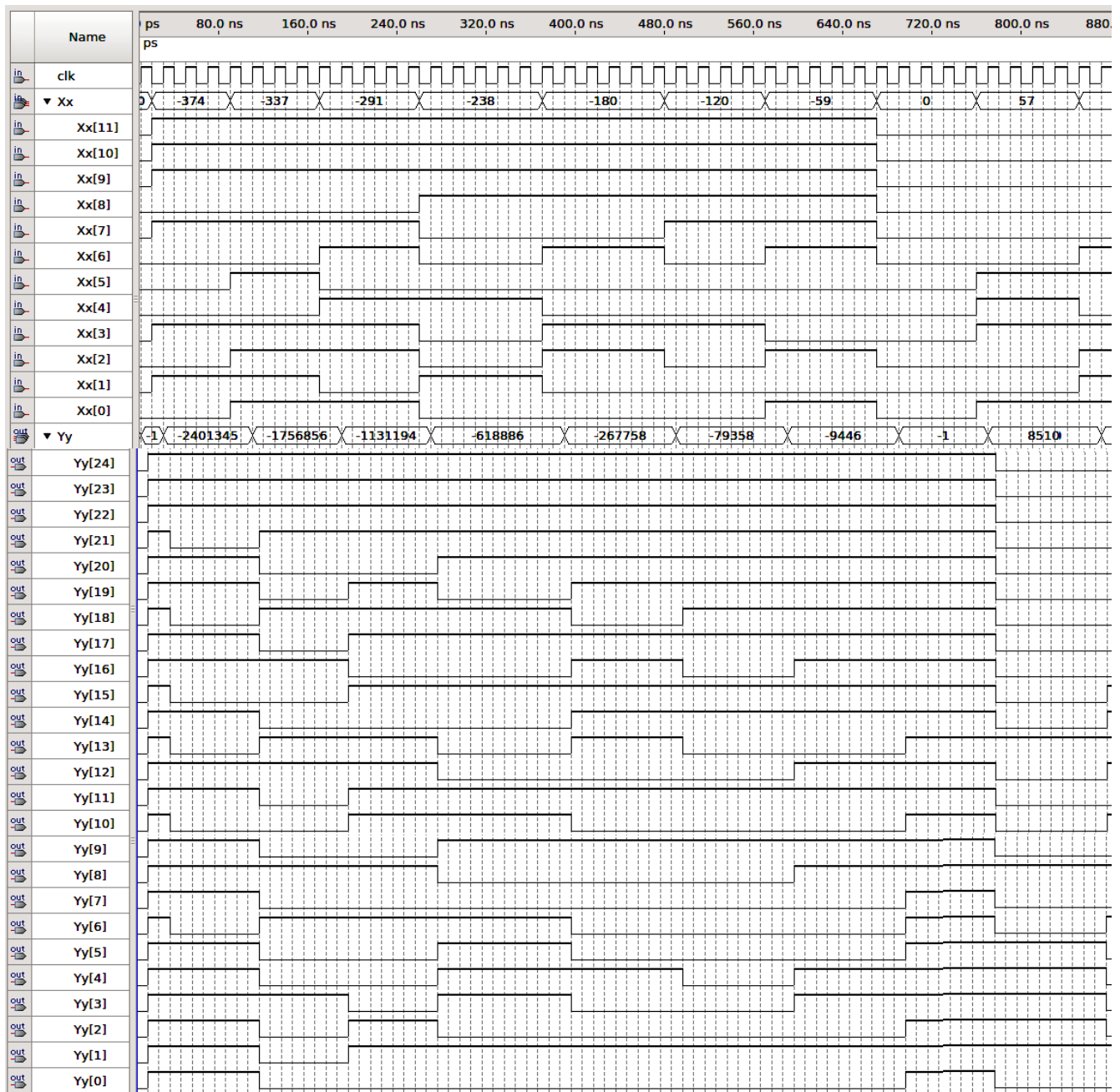


Рис. 4.23. Результат симуляції імплементованого на платформі FPGA методу посегментної апроксимації

### 4.5.3. Порядок роботи з комп'ютерною інтерферометричною системою на базі розроблених методів

Як зазначалося вище, комп'ютеризована система реконструкції поверхонь із інтерферограм білого світла складається з оптико-механічної частини (інтерферометр і система позиціонування), каналу передачі даних та спеціалізованого обчислювача, де, власне, і реалізуються методи реконструкції. Один із варіантів побудови комп'ютерних систем пов'язаний реалізацію методів реконструкції на

основі обчислювальних засобів безпосередньо вбудованих в інтерферометр (FPGA, DSP). Проте для поширених стаціонарних комп'ютерних систем як обчислювальний блок може використовуватися персональний комп'ютер (PC), тому методи реконструкції поверхні можуть виконуватися як на CPU, так і GPU. При цьому ПК також використовується для загального управління системою з боку дослідника через спеціалізоване програмне забезпечення, зберігання даних, інтерпретації результатів вимірювання та візуалізації реконструйованих поверхонь.

1. За допомогою прикладного програмного забезпечення у вигляді графічного інтерфейсу користувач задає основні параметри вимірювального процесу згідно програми дослідження: частоту збору кадрів, кількість пікселів, параметри попередньої обробки зображення, очікуваний діапазон вимірювання, формат збереження результатів вимірювання, параметри джерела світала, тощо.

2. Налаштовується положення плечей інтерферометра, відстань камери до об'єкту дослідження, фокусування, інтенсивність освітлення. Після цього відбувається переміщення об'єкту і пошук рівноваги інтерферометра, так щоб на інтеферограмі спостерігався центральний максимум. При цьому здійснюється корекція кутових відхилень об'єкту, тобто він розміщується максимально перпендикулярно до оптичної осі інтерферометра.

3. Для калібрування вимірювального каналу та ідентифікації сталих параметрів моделі, здійснюються вимірювання на еталонній поверхні із нормованими характеристиками (з відомою топологією, шороховатістю, тощо). Дані калібрування також записуються у пам'ять спеціалізованого обчислювача.

4. Після цього в інтерферометр поміщають об'єкт дослідження та повторюють виконання пункту 2. Потім запускається процес вимірювання відповідно до обраного режиму. Тут можливі варіанти пасивного збору зображень інтеферограм для подальшого опрацювання після завершення вимірювання, опрацювання результатів в реальному часі із розімкнутим зворотним зв'язком, а також опрацювання результатів в реальному часі із замкнутим зворотним зв'язком.

5. Результати вимірювання топології поверхні приводяться у відповідний заданий формат і зберігаються в пам'яті ПК на жорсткому диску. У випадку

замкнутого зворотного зв'язку результати вимірювання також подаються на вхід ПД-контролера. За потреби після визначення топології поверхні може розраховуватися непевність та інші метрологічні та кількісні характеристики. Зокрема можуть порівнюватися і візуалізуватися результати реконструкції засновані на різних методах.

### **Висновки до 4 розділу**

1. Адаптовано методи розроблені у 3 розділі для визначення профілю (2D розмірність) для реконструкції топології поверхні (3D розмірність). Розроблено високоефективний алгоритм прорідження кадрів, що має важливе значення для зниження обчислювальних затрат та дає змогу досліджувати швидкоплинні процеси. Обґрунтовано доцільність застосування вейвлет-перетворення для знешумлення інтерферограм, а шляхом моделювання доведено його ефективність - відношення сигнал/шум підвищено майже на 35 дБ.

2. Апробовано розроблені методи реконструкції лінійної та сферичної поверхонь реальних об'єктів із інтерферограм одержаних на двох різних інтерферометричних уставах. Якість реконструкції досить висока, що доводить правильність теоретичних допущень і ефективність розроблених методів.

3. На основі оцінки обчислювальної ефективності кожного методу реконструкції та придатності до розпаралелення, запропоновано доцільні варіанти реалізації на різних обчислювальних платформах. Встановлено, що метод посегментної апроксимації є найефективнішим (вимагає всього 6 операцій додавань і множень на 1 піксель). Обчислювально найскладнішими виявилися методи, які базуються на дискретному перетворенні Гільберта (понад 1500 операцій додавань і множень на 1 піксель). Метод Проні придатний до розпаралелення по точках і може бути ефективно реалізований на GPU.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну задачу у галузі комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем — розроблення нових і вдосконалення відомих методів реконструкції топології складних поверхонь із однієї інтерферограми білого світла. Імплементация розроблених методів на сучасні обчислювальні платформи забезпечує необхідну для інтерферометрії обчислювальну ефективність і точність реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами, що знаходять застосування у багатьох сферах науки і технологій. Отримано такі основні результати роботи:

1. Розглянуто сфери використання, особливості і переваги інтерферометрії білого світла. Охарактеризовано специфіку задачі реконструкції поверхні із інтерферограми білого світла, проаналізовано відомі методи опрацювання інтерферограм та оцінено їх придатність до реконструкції топології нелінійних поверхонь динамічних об'єктів.
2. Набула подальшого розвитку концепція побудови комп'ютерних систем реконструкції поверхні із інтерферограми білого світла в аспектах ефективного використання і розподілу обчислювальної потужності для опрацювання інтерферометричних зображень з метою зменшення впливу спотворень оптичної частини, розроблення нових і вдосконалення відомих методів реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами шляхом опрацювання інтерферограм у просторовій і частотній областях, а також обґрунтування критеріїв оцінювання обчислювальної ефективності та точності методів реконструкції.
3. Розроблено новий високоефективний метод реконструкції поверхонь складної топології, суть якого полягає у оберненні функції перетворення інтерферометричного каналу і застосуванні обчислювально простих методів поліноміальної апроксимації окремих сегментів інтерферограм білого світла. Дослідження показали, що цей метод поєднує в собі найвищу обчислювальну ефективність і точність: для реконструювання одного пікселя інтерферограми



необхідно виконати 6 операцій додавань і множень, а похибка реконструкції сферичної поверхні не перевищує 0,2%.

4. Вперше виконано декомпозицію сигналу ІБС на комплексні експоненти, що дало змогу застосувати модель Проні для визначення оптичної різниці ходу та реконструювати профіль нелінійної поверхні. Хоча метод у обчислювальному сенсі вимагає 88 додавань і множень для реконструкції 1 пікселя поверхні, проте він придатний до повного розпаралелення обчислень.
5. Вдосконалено метод реконструкції, який базується на визначенні повної фази унормованої несучої частоти сигналу ІБС. Особливістю методу є застосування інтерполяції для визначення оцінки огинаючої амплітуди інтерферограми, а також розв'язання проблеми неоднозначності функції арккосинус. Метод забезпечує найвищу точність (0,03 %) і є досить ефективним у обчислювальному сенсі (36 додавань і множень на піксель).
6. Розроблено та досліджено методи реконструкції профілю поверхні у області просторової частоти, що базуються на дискретних перетвореннях Фур'є та Гільберта. Методи реконструкції, пов'язані із обчисленням миттєвої фази сигналу ІБС хоча і є складними (більше 1500 додавань і множень на піксель), але забезпечують прийнятну точність реконструкції - похибка максимальна реконструкції не перевищує 0,4%.
7. Опрацьовано процедуру перенесення методів реконструкції із 2D розмірності (реконструкція профілю) на 3D розмірність (реконструкція топології). Розроблено високоефективний алгоритм прорідження кадрів, який знижує обчислювальні затрати і дає змогу за допомогою ІБС досліджувати швидкоплинні процеси. Показано можливість застосування цифрових нерекурсивних фільтрів та вейвлет-перетворення для знешумлення інтерферограм білого світла (відношення сигнал/шум збільшилося на 35 дБ).
8. Підтверджено ефективність розроблених методів для опрацювання реальних інтерферограм білого світла. Виконано реконструкцію лінійних і сферичних поверхонь одержаних у ході інтерферометричних вимірювань реальних об'єктів.

9. На основі аналізу властивостей розроблених методів реконструкції топології поверхні запропоновано ефективні варіанти їх імплементації на таких обчислювальних платформах як FPGA, GPU та DSP.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Goodwin E.P. Field Guide to Interferometric Optical Testing / E. Goodwin, J. Wyan. - Washington: SPIE Press, 2006. – 114 p.
2. Whitehouse D. J. Surface metrology / D. Whitehouse // Measurement Science Technology. - 1997, No. 8. - p. 955–972.
3. Kapłonek W. Zastosowanie koherencyjnej interferometrii korelacyjnej do pomiarów topografii powierzchni / W. Kapłonek, C. Łukianowicz // Przegląd Elektrotechniczny. – 2010, Nr 10(78). – s. 43-46.
4. Tay C.J. Development of a Sensor for Layered Micro-component Measurement using White Light Interferometry / C. J. Tay, C. Quan, M. Li // Sensor Device Technologies and Applications (SENSORDEVICES). In Proceedings: First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications. - Venice, 18-25 July 2010. - p. 21-24.
5. Taplin S. R. A novel application of white light sensing to dynamic oil film measurement / S. Taplin, A. Podoleanu, D. Webb et al. // Application of Photonic Technology. - 1997, No 2. - p. 863-869.
6. Xu Z. A novel white-light scanning interferometer for absolute nano-scale gap thickness measurement / Z. Xu, V. Shilpiekandula, K. Youceftoumi, S. F. Yoon // Optics Express – 2009, Vol. 17, Issue 17. - p. 97-98.
7. Matsuura T. Spherical concave mirror measurement by phase-shifting point diffraction interferometer with two optical fibers / T. Matsuura, K. Udaka, Y. Oshikane et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2010, Vol. 616, Issue 2-3. - p. 233-236.
8. Jing-tao D. Sensitivity analysis of thin-film thickness measurement by vertical scanning white-light interferometry / D. Jing-tao, L. Rong-sheng // Applied Optics. - 2012, Vol. 51, No. 23 - p. 5668-5675.
9. Manske E. Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology / E. Manske, G. Jäger, T. Hausotte, R. Füßl // Measurement Science and Technology/ - 2012, Vol. 23, No. 7.
10. Aram Lee, Baigang Zhang, Cheng Ma //Fiber-Based White-Light Interferometry for Nanoscale Distance Measurement and Control / A. Lee, B. Zhang, C. Ma, A. Wang and Y. Xu // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2012, vol. 24, No. 23. - p. 2136-2138.

11. D. Kapusi White Light Interferometry Utilizing the Large Measuring Volume of a Nanopositioning and Nanomeasuring Machine / D. Kapusi, T. Machleidt, E. Manske // In Proceedings: 12th International Colloquium on Surfaces, 28 - 29. January, 2008, Chemnitz, Germany.
12. Ivan Padron I. Interferometry – Research and Applications in Science and Technology / Ivan Padron. - Rijeka, Croatia: Janeza Trdine, 2012. – 474 p.
13. Bock W. J. Coherence multiplexing of fiber-optic pressure and temperature sensors based on highly birefringent fibers / W. J. Bock, W. Urbanczyk // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2000. - Vol.49, No.2. - p.392-397.
14. Wyant J.C. White light interferometry / J. Wyant // In Proceedings: Conference SPIE, 2002. -Vol. 4737. - p. 98-107.
15. Legande-Saenz R. Dynamic 3-D shape measurement method based on quadrature transform / R. Legande-Saenz, R. Rodriguez-Vera, A. Espinosa-Romero // Optics Express. – 2010.- Vol.18, No. 3. - p. 2639-2645.
16. Chen F., Brown G.M., Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods / F. Chen, G. Brown, M. Song // Optical Engineering. – 2000. – No. 39. – p. 10-22.
17. Sato S. Weighted integral method in white-light interferometry: envelope estimation from fraction of interferogram / S. Sato, S. Ando // In Proceedings: SPIE 7389, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI, Vol. 73892, June 15, 2009.
18. Hirabayashi, Akira // Fast Algorithm for Surface Profiling by White-Light Interferometry Using an Optical Filter with Symmetric Spectral Distribution.
19. Kieran G. Larkin //Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry.
20. Abdul-Rahman, H., Three-dimensional fourier fringe analysis and phase unwrapping. Ph.D. thesis. Liverpool John Moores University, (2007).
21. Michael Hssmann// Bayesian Estimation for White Light Interferometry.
22. Muhamedsalih H.M., Investigation of wavelength scanning interferometry for embedded metrology”, Ph.D. thesis, Univ. of Huddersfield, (2013).
23. Magalhaes P., Neto, P., Magalhães, C., New carré equation. Metrol. Meas. Syst. 17(2), (2010), 173–194.

24. Adamczak S., Makiela, W., Stepien, K., Investigating advantages and disadvantages of the analysis of a geometrical surface structure with the use of Fourier and wavelet transform. *Metrol. Meas. Syst.* 17(2), (2010), 233–244.
25. Stadnyk B., Manske E., Khoma A., State and prospects of computerized systems monitoring the topology of surfaces, based on white light interferometry. *Computational Problems of Electrical Engineering.* 4(1), (2014), 75-80.
26. Novák J. Computer analysis of interference fields using Matlab / J. Novák // In *MATLAB conference 2002*. Prague : Vydav. HUMUSOFT, 2002, p. 406-410.
27. Malacara D. *Optical Shop Testing* / Daniel Malacara. – New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007. – 883 c. – (Third Edition).
28. Leach R. *Introduction to Surface Texture Measurement* / R. Leach // *Optical Measurement of Surface Topography*. - Berlin, Germany: Springer. – 2011. - p.1-14.
29. Hariharan P. *Basics of Interferometry* / P. Hariharan. – San Diego, USA: Elsevier Inc., 2007. – 249 p. – (2nd ed).
30. Sládková J. *Interference of light* / J. Sládková. London: Iliffe, 1968. -164 c.
31. *Basics of White-Light Interferometry*. Polytec Tutorial [Электронный ресурс] // Polytec GmbH D-76337 Waldbronn Germany. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.polytec.com/fileadmin/user\\_uploads/Solutions/Surface\\_Profiling/Documents/OM\\_AN\\_IF0207\\_E\\_Basics\\_WLI.pdf](http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Solutions/Surface_Profiling/Documents/OM_AN_IF0207_E_Basics_WLI.pdf).
32. Мандель Л. *Оптическая когерентность и квантовая оптика: Пер. с англ.* / Л. Мандель, Э. Вольф. Москва: Наука, Физматлит, 2000. - 896 с.
33. Thomas Seiffert: *Schnelle Signalvorverarbeitung in der Weißlichtinterferometrie durch nichtlineare Signalaufnahme* [Электронный ресурс] // *Proceedings - Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik*, Stuttgart 2004. - – Режим доступа до ресурсу: [http://www.optik.uni-erlangen.de/fileadmin/leuchs/leuchs-uni/osmin/papers/2004/2004\\_169\\_TS\\_DGa004\\_schnelle.pdf](http://www.optik.uni-erlangen.de/fileadmin/leuchs/leuchs-uni/osmin/papers/2004/2004_169_TS_DGa004_schnelle.pdf).
34. Trittler S. *Processing of Interferometric Data: PhD thesis* / Stefan Trittler, Heidelberg University, Heidelberg, 2007.- 193 p.
35. Азарова В. В. Особенности применения интерферометра белого света для контроля качества прецизионных поверхностей и лазерных зеркал / В. Азарова, И. Чертович, Т. Цветкова // *Труды XI межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической*

- технике, электронике, экологии и медицине». Москва, 22-23 ноября 2010 г. – с. 127-133.
36. Nilsson B. Interferometric 3-d camera for shape and deformation measurements using ultra short laser pulses: Ph.D. thesis / Bengt Nilsson, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002. – 66 p.
  37. Wyant J.C. Advances in Interferometric Optical Profiling / J. Wyant, R. Creath // International Journal Machine Tools Manufacture. 1992. - Vol.32, No. 1/2. - p.5-10.
  38. Mingzhou Li. Development of fringe analysis techniques in white light interferometry for micro-component measurement: Ph.D. thesis / Li Mingzhou, National University of Singapore, 2008. – 149 p.
  39. Pavliček P. White-light interferometry on rough surfaces — measurement uncertainty caused by surface roughness / P.Pavliček, O. Ondřej Hýbl // Applied Optics. – 2008. - Vol. 47, No. 16. - p. 2941-2949.
  40. Bora E. Cylindrical surface analysis with white light interferometry: Ethem Bora / Master thesis, Halmstad University, Sweden, 2011. – 45 p.
  41. Kim J. G. Absolute temperature measurement using white light interferometry / J. Kim // Journal of the Optical Society of Korea. – 2000. - Vol.4, No.2. - p. 89-93.
  42. Cong-fei, W. The signal interrogation technology of MEMS optical fiber pressure sensor / W. Cong-fei, W. Guang-long, et al // In Proceedings: International Conference on Information and Automation, 2009. - p. 1285-1288.
  43. Totsu K. 125gm diameter fiber-optic pressure sensor system using spectrometer-based white light interferometry with high-speed wavelength tracking / K. Totsu, Y. Haga, et al. // In Proceedings Conference: Microtechnologies in Medicine and Biology, 2005. - p.170-173.
  44. Keulemans G. Absolute fiber-optic pressure sensing for high-temperature applications using white light interferometry / G. Keulemans, F. Ceysens, R. Puers // In Proceedings: Transducers, 16-20 June 2013. - p. 2325-2328.
  45. Kitagawa K. 3D Profiling of a Transparent Film using White-Light Interferometry / K. Kitagawa // In Proceedings: SICE Annual Conference, August 4-6, 2004. - p.585-590.
  46. Heikkinen V. Quality control of ultrasonic bonding tools using a scanning white light interferometer / V. Heikkinen, R. Kurppa, et al. // In Proceedings: IEEE International Ultrasonics Symposium, p. 1428-1430, 2010.

47. Manojlovic L.M. White-light interferometric sensor for rough surface height distribution measurement / L. Manojlovic, M. Zivanov, A. Marincic // IEEE Sensors Journal. – 2010. - vol.10, No 6. - p. 1125-1132.
48. Sang W. Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur Auswertung von Weißlichtinterferogrammen zur Bestimmung der dreidimensionalen Oberflächentopographie von Mikro- und Nanostrukturen als Anwendung für eine Nanopositionier- und -messmaschine: Master thesis / Wolfram Sang, TU Ilmenau, Germany, 2006. – 70 p.
49. Saraca Z. Phase recovery from interference fringes by Hilbert transform / Z. Saraca, H. Birkoekb, et al. // In Proceedings: Conference. 2009 - SPIE, Vol. 7443. - p. 11-19.
50. Sandoz P. An algorithm for profilometry by white-light phase-shifting interferometry / P. Sandoz // Journal of Modern Optics. – 1996. - Vol. 43, No. 8. - p.1545-1554.
51. Pacholik A. GPU vs FPGA: Example Application on White Light Interferometry / [A. Pacholik, M. Muller, W. Fengler et al.] // In Proc.: –International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs, Cancun, Mexico, 30 Nov - 02 Dec, 2011. - p. 481-486.
52. Bailey D. G. Design for Embedded Image Processing on FPGAs / D. G. Bailey – Wiley-IEEE Press, 2011. – 480 с. – (1 edition).
53. Russo L.M. Image convolution processing: A GPU versus FPGA comparison / Russo L.M., Pedrino E.C., Kato E., Roda V.O. // In Proc.: VIII Southern Conference on Programmable Logic (SPL), March 2012. - p.1–6.
54. Хома А. В. Дослідження методів знешумлення інтерферограми білого світла / А. Хома // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2015. – №76. – с. 74–80.
55. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. - Москва: Техносфера, 2006 – 616 с.
56. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – Санкт-Петербург: Питер, 2006. – 751 с. – (2-е изд.).
57. Numerical recipes in C. The Art of Scientific Computing / Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. – Cambridge: Cambridge University Press, 2002. – 925 с. – (2-nd edition).

58. Leader J. Numerical Analysis and Scientific Computation / Jeffery J. Leader. – Addison Wesley, 2004.
59. Шарый С. П. Курс вычислительных методов / С. П. Шарый. – Новосибирск: Институт вычислительных технологий СО РАН, 2016. – 529 с.
60. Кальянов А.Л. Оптическая низкокогерентная интерферометрия и томография / А.Л. Кальянов, В.В. Лычагов, Д.В. Лякин, О.А. и др. Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов: 2009. – 86 с.
61. DSP System Toolbox. Design and simulate streaming signal processing systems [Электронный ресурс] / The MathWorks, Inc. - Режим доступа до ресурсу: <http://www.mathworks.com/products/dsp-system>.
62. Стадник Б.І. Способи нормалізації інтерферограми білого світла для реконструкції профілю поверхні / Б. Стадник, А. Хома. // Science and Education a New Dimension. Natural and technical sciences. – 2015. - vol. III, No 6, Issue 54. – p. 70-73.
63. Yatsyshyn S. Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part 13. Segmental Approximation for Surface Topology Reconstruction / S.Yatsyshyn, B. Stadnyk, E. Manske, A. Khoma. // Sensors and Transducers. – 2015. – Vol. 195, Issue 12. – p. 50–55.
64. Митрофанов Г. Основы и приложения метода Прони-фильтрации / Г. Митрофанов, В. Прийменко // Технологии сейсморазведки. – 2011, № 3. - с. 93–108.
65. Baron de Prony G.R. Essai experimental et analytique: sur les lois de La dilatabilité de fluides élastique et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'alkool, á différentes temperatures / G. Baron de Prony // J. l'École Polytech. – 1795. Vol. 1, No 22. - p. 24–76. (in Franch)
66. Zygarlicki J. Variable-frequency Prony method in the analysis of electrical power quality / J. Zygarlicki, J. Mroczka // Metrology and Measurement Systems. – 2012. - Vol. XIX, No. 1. – p. 39–48.
67. Marple S. Digital spectral analysis with applications / S. Marple, J. Lawrence. – New York: Prentice-Hall, Inc., 1987. – 512 p.
68. Lyons R. G. Understanding digital signal processing / Richard G. Lyons. – New York: Pearson Education, Inc, 2010. – 940 с. – (3rd ed).



69. Стадник Б. Застосування методу Проні для реконструкції топології поверхні із інтерферограми білого світла / Б. Стадник, А. Хома // Тези доповідей: II Міжнародна науково-практична конференція «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» – Львів, 28-30 травня 2015 р. – с. 222-224.
70. Ifeachor E. C. Digital Signal Processing: a Practical Approach / E. C. Ifeachor, B. W. Jervis. – Harlow, England: Pearson Education Ltd., 2002. – (2nd edition)
71. Khoma A. Surface topology reconstruction from the white light interferogram by the means of Prony analysis / A. Khoma, J. Zygarlicki // Metrology and Measurement Systems. – 2015. – vol. XXII, No. 4. – p. 479–490.
72. Основи метрології та вимірювальної техніки / [М. М. Дорожовець, В. П. Мотало, Б. І. Стадник та ін.]; під ред. Б.І. Стадника. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005. – 656 с.
73. Lyons R.G. Understanding Digital Signal Processing / R.G. Lyons - Pearson Education, Inc. 2011, 954 p. – (3rd edition).
74. Smith J. O. Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) / J. O. Smith. – Stanford: CCRMA, 2002. – 250 с.
75. Zieliński T. P. Cyfrowe przetwarzanie sygnałów Od teorii do zastosowań / Tomasz P. Zieliński. – Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2007. – 832 с.
76. Хома А. В. Метод реконструкції поверхні з інтерферограми білого світла на основі перетворення Гільберта / А. В. Хома. // Вісник Національного університету «Львівська Політехніка». – 2014. – №800. – с. 168–176.
77. Овсянников Е. П. Сравнительный анализ сложности реализации быстрых цифровых преобразований на RISC-процессорах / Е. П. Овсянников, С. Е. Петров, К. В. Юрков // Изв. вузов. приборостроение. – 2011, т. 54, № 9. – с. 34–38.
78. Manske E. Metody rekonstrukcji powierzchni z interferogramu światła białego bazujące się na transformacie Hilberta / E. Manske, A. Khoma // Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Elektrotechnika – 2015. – Nr 34 – s. 71-75.
79. Wrzuszczak M. Badanie dokładności rekonstrukcji powierzchni z interferogramu światła białego z wykorzystaniem metod bazujących na transformacie Hilberta / M. Wrzuszczak, A. Khoma // Przegląd Elektrotechniczny – 2016. – Nr 4 – s. 210-215.

80. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н. К. Смоленцев. – Москва: Изд-во ДМК, 2005. – 304 с.
81. Хома А. В. Розроблення та дослідження методу реконструкції поверхні на основі інтерферограми білого світла / А. Хома // Тези доповідей: Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2015». – Славське, 2- 6 лютого 2015 р. – с. 141-144.
82. Gdeisat M. Two-Dimensional Phase Unwrapping Problem [Електронний ресурс] / M. Gdeisat, F. Lilley – Режим доступу до ресурсу: [https://www.ljmu.ac.uk/~media/files/ljmu/about-us/faculties-and-schools/tae/geri/two\\_dimensional\\_phase\\_unwrapping\\_finalpdf.pdf?la=en](https://www.ljmu.ac.uk/~media/files/ljmu/about-us/faculties-and-schools/tae/geri/two_dimensional_phase_unwrapping_finalpdf.pdf?la=en).
83. Smith S. W. Digital Signal Processing. A Practical Guide for Engineers and Scientists / S. Smith. - Newnes, 2012. - 720 p.
84. Solutions on Embedded Systems / [M. Conti, S. Orcioni, N. Martinez et al.]. – London New York: Springer Dordrecht Heidelberg, 2011.
85. Wavelet Toolbox. Analyze and synthesize signals and images using wavelets [Електронний ресурс] / The MathWorks, Inc. - Режим доступу до ресурсу: <http://www.mathworks.com/products/wavelet>.
86. Хома А. В. Застосування вейвлет-перетворення для знешумлення інтерферограм білого світла / А. Хома // Тези доповідей: III Міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах-2015». – Вінниця, 27-29 жовтня 2015 р. – с. 16.
87. Snyman J. A. Practical Mathematical Optimization: An Introduction to Basic Optimization Theory and Classical and New Gradient-Based Algorithms / Jan A. Snyman. – New York: Springer US, 2005.
88. Ullmann V. White-light interferometers with polarizing optics for length measurements with an applicable zero-point detection / V. Ullmann, S. Emam, E. Manske // Measurement Science and Technology. - 2015, No 26 (8). – p. 1-15.
89. Fykse Egil. Performance comparison of GPU, DSP and FPGA implementations of image processing and computer vision algorithms in embedded systems. Norwegian University of Science and Technology, Master thesis, Norwegian University of Science and Technology 2013.
90. Schoenwetter D. A Speed-Up Study for a Parallelized White Light Interferometry Preprocessing Algorithm on a Virtual Embedded Multiprocessor System / D.

- Schoenwetter, M. Schneider, D. Fey // In Proc.: International Conference on Architecture of Computing Systems, February 29, 2012, Munich, Germany. – p. 469-480.
91. CP70 & CP80. Ultra High Resolution, High Speed Camera Heads The perfect high speed imaging tool for systems integrators. [Электронный ресурс] // CamPerform Coaxpress Series. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.nacinc.com/datasheets/CamPerform-Coaxpress-CP70-CP80.pdf>.
92. Balch K. S. Replacing 16 mm Film Cameras with High Definition Digital Cameras [Электронный ресурс] / Kris S. Balch // Eastman Kodak Company Motion Analysis Systems – Режим доступа до ресурсу: [http://www.motionvideoproducts.com/MVP%20papers/Kodak%20RO\\_SPIE.pdf](http://www.motionvideoproducts.com/MVP%20papers/Kodak%20RO_SPIE.pdf).
93. NVIDIA. CUDA C programming guide. [Электронный ресурс] // NVIDIA, PG-02829-001\_v7.5, September 2015. – Режим доступа до ресурсу: [http://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUDA\\_C\\_Programming\\_Guide.pdf](http://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUDA_C_Programming_Guide.pdf).
94. Xilinx. LogiCORE Fast Fourier Transform v8.0. [Электронный ресурс] // Xilinx, DS808, July 25, 2012. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.xilinx.com/support/documentation/ip\\_documentation/ds808\\_xfft.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/ds808_xfft.pdf).
95. Newton's Method to Perform Division [Электронный ресурс] / CS 3343/3341 Analysis of Algorithms – Режим доступа до ресурсу: <http://www.cs.utsa.edu/~wagner/CS3343/newton/division.html>.
96. Newton's Method [Электронный ресурс] / 6.006 Introduction to Algorithms – Режим доступа до ресурсу: <http://courses.csail.mit.edu/6.006/spring11/rec/rec23.pdf>.
97. Lambers J. Newton's Method [Электронный ресурс] / J. Lambers – Режим доступа до ресурсу: <http://www.math.usm.edu/lambers/mat460/fall09/lecture10.pdf>.

**ДОДАТОК А****Акти впровадженнь результатів дисертаційної роботи**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор  
ПАТ НВО «Термоприлад»

Гук О.П.

10 2016 р.

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи

**Хоми Анни Володимирівни****«Методи та засоби комп'ютерного опрацювання сигналів  
інтерферометрії білого світла»**

представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Комісія у складі:

Заступника генерального директора – головного інженера Лаха О.І. та головного фахівця з пірометрії Кубишин С.М. даним актом підтверджує, що основні результати наукових досліджень, отримані при виконанні дисертаційної роботи Хоми А.В., використовуються у нашій організації для побудови багатоканальних регуляторів-вимірювачів температури, вологості та інших фізичних величин для їх калібрування і повірки.

Особливо слід відзначити ефективність і простоту розроблених в дисертаційній роботі методів комп'ютерного опрацювання сигналів інтерферометрії білого світла, що дало змогу контролювати швидкоплинні процеси за допомогою первинних перетворювачів температури та інших фізичних величин (деформації, вібрації тощо). Результати досліджень також можуть бути використані для покращення метрологічних та експлуатаційних характеристик портативних засобів вимірювальної техніки, зокрема кварцового та ядерно-квадрупольного резонансних термометрів.

Заступник генерального директора

Лях О.І.

Головний фахівець з пірометрії

Кубишин С.М.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
 Національного університету  
 «Львівська політехніка»  
 проф. Чухрай Н.І.

10 2016 р.

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

*Хоми Анни Володимирівни*

**«Методи та засоби комп'ютерного опрацювання сигналів інтерферометрії білого світла»** представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – *комп'ютерні системи та компоненти*


Комісія у складі – голови начальника науково-дослідної частини, к.т.н., доцента Жук Л.В. та членів: завідувача кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, д.т.н, професора Стадника Б.І., завідувача відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н. Лазько Г.В. і заступника начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М., цим актом підтверджують, що результати дисертаційної роботи Хоми А.В. використовувалися при виконанні науково-дослідної роботи “Дослідження засобів вимірювання геометричних розмірів оптичними методами в нанометровому діапазоні” (№ держреєстрації 0113U003188, наказ Міністерства освіти і науки України від 25.10.2012 р. № 1193).

Зокрема Хомою А.В. розроблено нові та вдосконалено відомі методи реконструкції профілю і топології складних поверхонь зі змінними в часі параметрами із інтерферограми білого світла, а також проведено дослідження їх обчислювальної ефективності та точності.

Голова комісії,  
 заступник начальника науково-дослідної  
 частини, к.т.н. доц.

 Жук Л.В.

Члени комісії:  
 зав. каф. інформаційно-вимірювальних  
 технологій, д.т.н. проф.

 Стадник Б.І.

зав. відділу науково-організаційного  
 супроводу наукових досліджень, к.т.н.

 Лазько Г.В.

заст. нач. планово-фінансового відділу

 Чулой Т.М.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи  
 Національного університету  
 «Львівська політехніка»  
 к.т.н., доц. Давидчак О. Р.  
 10 2016 р.

## АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес

*Хоми Анни Володимирівни*

**«Методи та засоби комп'ютерного опрацювання сигналів інтерферометрії білого світла»**  
 представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю  
 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Комісія НУ «Львівська політехніка» у складі:

Голова комісії – голова науково-методичної ради інституту комп'ютерних технологій та метрології, д.т.н., проф. Байцар Р.І.

Члени комісії: професор кафедри "Інформаційно-вимірювальні технології", д.т.н., проф. Скоропад П.І., професор кафедри "Інформаційно-вимірювальні технології", д.т.н., проф. Микитин І.П. і професор кафедри "Інформаційно-вимірювальні технології", д.т.н., проф. Прохоренко С.В.

даним актом підтверджує, що проведені дисертантом наукові дослідження виконувалися нею на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка» у співпраці з кафедрою вимірювання процесів і сенсорної техніки Технічного університету міста Ільменау (Німеччина). Основні положення та результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» при вивченні дисциплін:

- «Комп'ютерне опрацювання вимірювальної інформації» для студентів напрямку підготовки 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології», тема №5 «Дискретне перетворення Фур'є та Гільберта» - алгоритми дискретного перетворення Фур'є та Гільберта для опрацювання інтерферографічних зображень білого світла;
- «Спеціальні методи вимірювань» для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», спеціалізації «Метрологія та вимірювальна техніка», тема №10 «Оптичні методи вимірювання геометричних розмірів в нанометровому діапазоні» - методика синтезу поверхонь із заданими параметрами та симуляції інтерферограм білого світла, для оцінювання обчислювальних ефективності і точності методів реконструкції топології поверхні.

Голова комісії,  
 голова науково-методичної ради ІКТА  
 д.т.н., проф.

 Байцар Р.І.


Члени комісії:  
 проф. каф. ІВТ, д.т.н. проф.

 Скоропад П.І.

проф. каф. ІВТ, д.т.н. проф.

Микитин І.П.

проф. каф. ІВТ, д.т.н. проф.

 Прохоренко С.В.

## ДОДАТОК Б

**КОДИ В ПРОГРАМНОМУ ПАКЕТІ МАТЛАВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ВИБРАНИХ МЕТОДІВ РЕКОНСТРУКЦІЇ ПРОФІЛЮ І ТОПОЛОГІЇ  
СИНТЕЗОВАНОЇ І РЕАЛЬНОЇ ПОВЕРХОНЬ**

## • ДОДАТОК Б.1

**Код програми у пакеті MatLab для реконструкції за методом  
посегментної апроксимації профілю синтезованої поверхні із інтерферограми  
білого світла**

```

% This script PiecewiseFitting_OneRow serves for surface
% reconstruction based on calibration and piecewise fitting
%
%   Author:      Anna Khoma
%   Created:     20.02.2015

%%
clc; clear all; close all;
parentpath = cd(cd('..'))
addpath(genpath(fullfile(parentpath, 'Functions')));
% add folders with all subfolders
run(fullfile(parentpath, 'ConfigFiles\ConfigurationFile'));
% add configuration file
load CalibrationData

% setting surface topography
%h=tilted_surface('3D');
h=spherical_surface('3D');

% simulation of interferogramm
[I0, Im, lambda0, delta_lambda, Ifull] =
InterferogramSimulation(h);           % calculating the
interferogramm

%% Measuring Stage
I=Ifull-I0;

% interferogram preprocessing
[Imax, indMax] = extrema(I(500, :)); % local maxima search
indMax = sort(indMax);

```



```

I = I(:,indMax(1):indMax(end)); % interferogram cutting
(only data within first and last maxima)
h = h(:,indMax(1):indMax(end)); % surface cutting (only data
within first and last maxima) for visualisation

%%
% interferogram segmentation
indExtrema=cell(size(I,1),1); % cell array of empty
matrices
IExtrema=cell(size(I,1),1);
for row=1:1:size(I,1)
    [Imax,indMax,Imin,indMin] = extrema(I(row,:));
% local maxima search
    indExtrema(row) = {sort([indMax indMin])};
    IExtrema(row) = {I(row,indExtrema{row,:})};
end

vis_row=200
%%%%%%%%%%
% segment alignment (search identical calibration and
measured segments)
h_rec = zeros(size(h)-2);
for row=1:size(h_rec,1)
    delta=15e-3;
    length(IExtrema{row});
    for i= 1:length(IExtrema{row}) - 1; % number of
segments in measured signal
        Max = max([ IExtrema{row}(1,i) IExtrema{row}(1,i+1) ]);
        Min = min([ IExtrema{row}(1,i) IExtrema{row}(1,i+1) ])
;
        for j = 1:length(p)
            if Max <= (IMax(j)+delta) && Min >= (IMin(j)-delta)
                IMax(j)+delta;
                IMin(j)-delta;
                offset = j;
                break;
            end
        end
        indStart = indExtrema{row}(1,i); % first index
for current segment
        indStop = indExtrema{row}(1,i+1) - 1; % first index
for current segment
        I_ = I(row,indStart : indStop);
        h_rec(row,indStart : indStop) = [polyval(p{offset},I_)];
% contantinating current segment with previous
    end
end

```

```

end

figure(100),
mesh(h_rec*1e6),colormap(gray),
h_rec = symmetry_obteining (h_rec,I);

Error=reduced_error(h_rec,h(1:length(h)-1));
max(Error)
Error_res=100*residual_error(h_rec,h(1:length(h)-
1))/abs(max(h)-min(h))

% reconstructed surface visualization
%%
%% VISUALISATION RESULTS %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Nx=size(I,2);
figure(4),
plot(h,'r')
hold on
plot(h_rec,'b--')

figure(3); hold on;grid; % reduced error
visualisation
plot(Error,'k','LineWidth',1); grid on;
xlabel('n, samples'), ylabel('\gamma(T),%'), title('')
set(gcf,'Units','centimeters'), % set the
measurement units to centimeters
set(gcf,'Position',[5 5 7.8 3.5]) % set the size of
figure in centimeters [xPoint yPoint xSize ySize]

```

- ДОДАТОК Б.2

Код програми у пакеті MatLab для реалізації алгоритму прорідження кадрів

```

% This script Binarized intend for selectection the
% informative interferogram pictures from serial frames
% registrated by CCD camera
%
%   Author:      Anna Khoma
%   Created:     20.02.2015

%Convert image
clc, clear all,close all,

% Loading of first interferogram picture
I1 = imread('VQ170_Pmax_20001.bmp');
I1=rgb2gray(I1);

% Loading of second interferogram picture
I2 = imread('VQ170_Pmax_20002.bmp');
I2=rgb2gray(I2);

% Converting to binary images
IB1=im2bw(I1); IB2=im2bw(I2);

% Comparating of two prepared images
DIB=xor(IB2,IB1);
S=sum(DIB,1);

% Counting total amount of image pixels
totalPixels = 1024*1280

% Count difference between pixel images in persent
representation
SS=sum(S)/totalPixels * 100,

%%% VISUALISATION RESULTS %%%
%%%%%%%%%%
figure(1),
imshow(I1),
figure(2),
imshow(I2),
figure(3),
imshow(~DIB)

```

- ДОДАТОК Б.3

**Код програми у пакеті MatLab для реконструкції топології поверхні  
реального об'єкту із інтерферограми, одержаної експериментальним шляхом**

```
% This script ATAN_Real_3D serves for topogaphy
% reconstruction from real
% interferogram after wavelet denoising based
% on the phase detection from tangent function
%
% Author:      Anna Khoma
% Created:     21.03.2016

%%
clc,
clear all,
close all,

%% Load the interferogram

% the path to the pictures
path =
'D:\Science\STUDIUM\Ilmenau\MASTERARBEIT\Messdaten\VQ170_Pmax
_2';

RGB_Image=imread(fullfile(path,'VQ170_Pmax_20016.bmp'));
Image=rgb2gray(RGB_Image);
I_noise = im2double(Image);

%% Denoising with wavelet transform

w_name = 'db6';
% Type of Wavelet
Lev = 3;
% Decomposition Level

[c, s] = wavedec2(I_noise, Lev, w_name);
% Wavelet Decomposition of Image

cA3 = appcoef2(c, s, w_name, 3);
% Extract 2-D approximation coefficients for third level
cH3 = detcoef2('h', c, s, 3);
% Extract detail horizontal coefficients for third level
cV3 = detcoef2('v', c, s, 3);
% Extract detail vertical coefficients for third level
```

```

cD3 = detcoef2('d', c, s, 3);
% Extract detail diagonal coefficients for third level

cA2 = appcoef2(c, s, w_name, 2);
% Extract 2-D approximation coefficients for second level
cH2 = detcoef2('h', c, s, 2);
% Extract detail horizontal coefficients for second level
cV2 = detcoef2('V', c, s, 2);
% Extract detail vertical coefficients for second level
cD2 = detcoef2('d', c, s, 2);
% Extract detail diagonal coefficients for second level

cA1 = appcoef2(c, s, w_name, 1);
% Extract 2-D approximation coefficients for first level
cH1 = detcoef2('h', c, s, 1);
% Extract detail horizontal coefficients for first level
cV1 = detcoef2('V', c, s, 1);
% Extract detail vertical coefficients for first level
cD1 = detcoef2('d', c, s, 1);
% Extract detail diagonal coefficients for first level

% Calculating of Threshold for Third Level of Decomposition
std_ch3 = median(abs(cH3(:)))/4;
std_cv3 = median(abs(cV3(:)))/4;
std_cd3 = 4*median(abs(cD3(:)))/1;

% Calculating of Threshold for Second Level of Decomposition
std_ch2 = 16 * median(abs(cH2(:)));
std_cv2 = 16 * median(abs(cV2(:)));
std_cd2 = 64 * median(abs(cD2(:)));

% Calculating of Threshold for First Level of Decomposition
std_ch1 = 256 * median(abs(cH1(:)));
std_cv1 = 256 * median(abs(cV1(:)));

% Building of Threshold Matrix 3*N
thr_h = [std_ch1 std_ch2 std_ch3]
thr_v = [std_cv1 std_cv2 std_cv3]
thr_d = [0 std_cd2 std_cd3]

THR = [1.*thr_h; 1.*thr_d; 1.*thr_v];

% De-noising Image
[I_denoise, cx, sx] = wdencmp('lvd', c, s, w_name, Lev, THR,
's');

vis_row=527;

```

```

figure (3), % Plot of
Row of Noise, Pure and Denoise Image
plot(I_noise(vis_row,:), 'b')
hold on
plot(I_denoise(vis_row,:), 'r'), grid on
set(gcf, 'PaperUnits', 'centimeters'),

%% TOPOGRAPHY RECONSTRUCTION

Ifull = I_denoise;

% Remove constant component
I = Ifull - mean(mean(Ifull, 2));
figure (33),
plot(I(vis_row,:), 'k'), grid on

% Calculation of quadrature component
for i = 1:1:size(I, 1)
    IH = hilbert(I(i,:));
% Hilbert transformation for each row
    IH_r(i,:) = real(IH);
    IH_i(i,:) = imag(IH);
end
fi = atan2(IH_i, IH_r);
% phase calculation with arctangens function

for i = 1:1:size(I, 1)
    fi(i,:) = unwrap(fi(i,:));
% unwrap along each row
end

figure(22),
mesh(fi)

figure (4),
plot(fi(vis_row,:), 'b')

%% Symetry obtaining
i_max = 527; % point of symetry x-axis
j_max = 645; % point of symetry y-axis

for i=1:1:size(fi, 1)
    fi(i,:) = fi(i,:) - fi(i, j_max);
    fi(i, j_max:end) = - fi(i, j_max:end);
end

```

```

figure (444),
plot(fi(vis_row,:), 'b')

figure(22),
mesh(fi)
%% y-dimension reconstruction
j_row = 645; % number of row for y-dimension reconstruction
IH2 = hilbert(I(:,j_row));
% Hilbert transformation for each row
IH_r2 = real(IH2);
IH_i2 = imag(IH2);
fi2 = unwrap(atan2(IH_i2,IH_r2));
fi2 = fi2 -fi2(i_max);
fi2(i_max:end) = - fi2(i_max:end)
figure(111),
plot(fi2)

for i = 1:1:size(I,1)
    fi(i,:) = fi(i,:) + fi2(i);
% unwrap along each row
end

h1=fi.*0.417/2/pi;
figure(100)
mesh(h1)
colormap(gray),
axis([-Inf 1280 -Inf 1024 -Inf Inf])
xlabel('n, вибірка'), ylabel('m, вибірка'), zlabel('h, мкм')
set(gcf, 'Units', 'centimeters'), % set the
measurement units to centimeters
set(gcf, 'Position', [5 5 10 10]) % set the size of
figure in centimeters [xPoint yPoint xSize ySize]

```

## ДОДАТОК В

### Імплементация на платформі FPGA методу посегментної апроксимації та симуляція виконання у Quartus II

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use IEEE.numeric_std.all;

entity transformer is
port
    (X: in std_logic_vector(11 downto 0);
    CLK: in bit;
    Y: out std_logic_vector(71 downto 0));
end transformer;

architecture Input2Output of transformer is
type typeCoefficient is array (0 to 3) of real;
constant Coefficient: typeCoefficient:= ( -0.9456369757174427,
                                           0.24971907688932007,
                                           -0.0009057189959910791,
                                           0.04600243808988049);
signal outY: signed(71 downto 0);
begin
    p0: process (X,CLK)
    begin
        if (CLK'event and CLK='1') then
            outY <= to_signed(integer(Coefficient(0)*1024.0),12)
                +(signed(X)*integer(Coefficient(1)*1024.0))
                +(signed(X)*signed(X)*integer(Coefficient(2)*1024.0))
        end if;
    end process;
end architecture;

```



```
+(signed(X)*signed(X)*signed(X)*integer(Coefficient(3)*1024.0));  
    end if;  
end process;  
Y<=std_logic_vector(shift_right(outY,10));  
end architecture Input2Output;
```