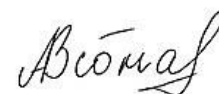


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

**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

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України та в Технічному університеті міста Ільменау (Федеративна Республіка Німеччина)

Наукові керівники: доктор технічних наук, професор  
**Стадник** Богдан Іванович,  
завідувач кафедри “Інформаційно-вимірювальні технології” Національного університету “Львівська політехніка”

доктор технічних наук, професор  
**Манске** Ебергард,  
завідувач секції прецизійної вимірювальної техніки  
Технічного університету Ільменау, м. Ільменау,  
Федеративна республіка Німеччина

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Карпінський** Микола Петрович,  
завідувач кафедри інформатики та автоматики  
Університету у Бельсько-Бялій, м. Бельсько-Бяла,  
Республіка Польща

доктор технічних наук, професор  
**Воробель** Роман Антонович,  
завідувач відділу інтелектуальних технологій і систем  
діагностики Фізико-механічного інституту  
ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

Захист відбудеться “24” лютого 2017 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, м. Львів-13, вул. С.Бандери, 28а, ауд. 711, V навч. корп.).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “ 20 ” січня 2017 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.08  
д. т. н., проф.



Луцик Я.Т.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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. 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.

Інтерферометрія білого світла, маючи суб-мікрометрову латеральну роздільну здатність (вздовж поверхні) та нормальну до площини нанометрову, є потужним інструментом вимірювання і аналізу поверхонь у широкому діапазоні значень, від кількох мікрометрів до декількох сотень міліметрів. Прикладами використання ІБС є контроль однорідності поверхні, товщини тонких плівок, якості клинів, увігнутості дзеркал тощо.

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.

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

Порівняно із традиційною монохроматичною інтерферометрією, опрацювання інтерферограм білого світла з метою реконструкції топології поверхні є істотно складнішим. Це передовсім зумовлено згасанням сигналу інтенсивності або, іншими словами, наявністю огинаючої амплітуди інтерферограм. 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. Проте відомі методи не дають задовільних результатів для завдань, коли робоча поверхня є нелінійною (зокрема сферичною), а її параметри змінюються з плином часу.

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. На сьогоднішній день оптико-механічні та електронні вузли інтерферометрів забезпечують отримання інтерферограм із 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).

Таким чином, актуальним є завдання розроблення нових ефективних у обчислювальному та метрологічному сенсі 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 виконувалась в рамках пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки в Україні, а також в рамках держбюджетної науково-дослідницької роботи: «Дослідження засобів вимірювання геометричних розмірів оптичними методами в нанометровому діапазоні» ДБ/Діапазон (номер держреєстрації 0113U003188, 2013-2014 рр, Наказ Міністерства освіти і науки України від 22.10.2012 р. № 1193).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення нових і вдосконалення відомих методів реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами із інтерферограми білого світла та дослідження способів їх ефективної з погляду швидкодії і точності реалізації на сучасних обчислювальних платформах.

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 вискоефективних 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 методіку 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 та з урахуванням 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 ефективного впровадження розроблених методів і алгоритмів реконструкції топології поверхні на різні обчислювальні платформи, 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 і зображень, 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 і експериментально підтверджено 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 розпаралелити обчислення та 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 за точками 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. Опрацьовано 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 проблему 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.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати, викладені в роботі, отримані автором особисто. Із публікацій, написаних у співавторстві, здобувачу належить: [2] – порівняльний аналіз відомих методів реконструкції поверхні із ІБС за розробленими критеріями, оцінювання їх придатності до реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами; [3] - розроблення способів оцінювання огинаючої амплітуди сигналу інтерферограми, методики оцінювання точності; [4] – декомпозиція сигналу інтерферограми на комплексні експоненти, визначення інформативного параметра із моделі Проні, аналіз ефективності методу для реконструкції нелінійних поверхонь; [5] - розроблення методу посегментної апроксимації та способу визначення коефіцієнтів апроксимуючого поліному, оцінювання обчислювальної ефективності і точності розробленого методу; [6] - дослідження умов та обмежень застосування теорії аналітичного сигналу до інтерферограми білого світла; [8] – розроблення методики і критеріїв порівняння ефективності і точності критеріїв порівняння розроблених методів реконструкції профілю поверхні з інтерферограми білого світла; [10] – розроблення методики оцінювання точності і ефективності реконструкції профілю поверхні за методом Проні.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати роботи апробовано у п'яти доповідях, що доповідалися 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, переліку цитованої літератури із 97 найменувань, а також трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 149 сторінок друкованого тексту, у тому числі 128 сторінок основного тексту, включаючи 71 ілюстрацій і 8 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету, завдання і методи дослідження, визначено наукову новизну, практичне значення та особистий внесок автора в отриманні результатів, подано відомості про апробацію дисертації та публікацію її основних положень.

У першому розділі проведено огляд та порівняльну характеристику відомих технологій контролю топології поверхні. Зазначено такі переваги інтерферометрії білого світла, як відсутність фізичного контакту із досліджуваною поверхнею, висока роздільна здатність і швидкість сканування, можливість дослідження об'єктів зі значними геометричними розмірами, а також із різкими перепадами і ухилами. Проаналізовано особливості дослідження топології поверхні за допомогою інтерферометрів білого світла.

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

$$h = \frac{T}{\nu}, \quad (1)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт заломлення середовища.

Наведено математичну модель інтерферограми білого світла, яка пов'язує інформативний параметр  $T$  із сигналом інтенсивності інтерферограми  $I(T)$ :

$$I(T) = E(T) \times C(T) = I_M \left[ \exp\left(-\frac{4 \cdot \Delta\lambda^2 \cdot T^2}{\lambda_0^4}\right) \right] \times \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0} T\right), \quad (2)$$

де  $E(T)$ ,  $C(T)$  і  $I_M$  – відповідно огибаюча амплітуди, несуча частота і максимальне значення сигналу інтенсивності;  $\lambda_0$  і  $\Delta\lambda$  – центральна довжина хвилі і ширина спектру джерела світла.

Встановлено, що інтерферометрія білого світла знаходить 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.

Виконано порівняльний аналіз відомих методів реконструкції топології поверхні в інтерферометрії білого світла за критеріями області аналізу (просторова, частотна), кількості інтерферографічних зображень, необхідних для реконструкції поверхні, можливості динамічних вимірювань, обчислювальної складності, стійкості до шумів, інваріантності до розривів. Встановлено, що відомі методи ефективно розв'язують задачу реконструкції 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.

Сформульовано напрямки теоретичних та експериментальних досліджень, що передбачають пошук нових і вдосконалення у обчислювальному і метрологічному сенсах відомих методів реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами, а також їх ефективну реалізацію на різних обчислювальних платформах, у тому числі придатних для застосування у вбудованих системах, що дозволить розширити сфери застосувань комп'ютерних систем інтерферометрії білого світла.

**У другому розділі** розроблено концепцію побудови комп'ютерної системи ІБС дослідження топології поверхні. Наведено структуру комп'ютерної системи (рис.1), до складу якої входять інтерферометр білого світла, система позиціонування досліджуваного об'єкту та спеціалізований обчислювач.

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

- позиціонування досліджуваного об'єкту 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.

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



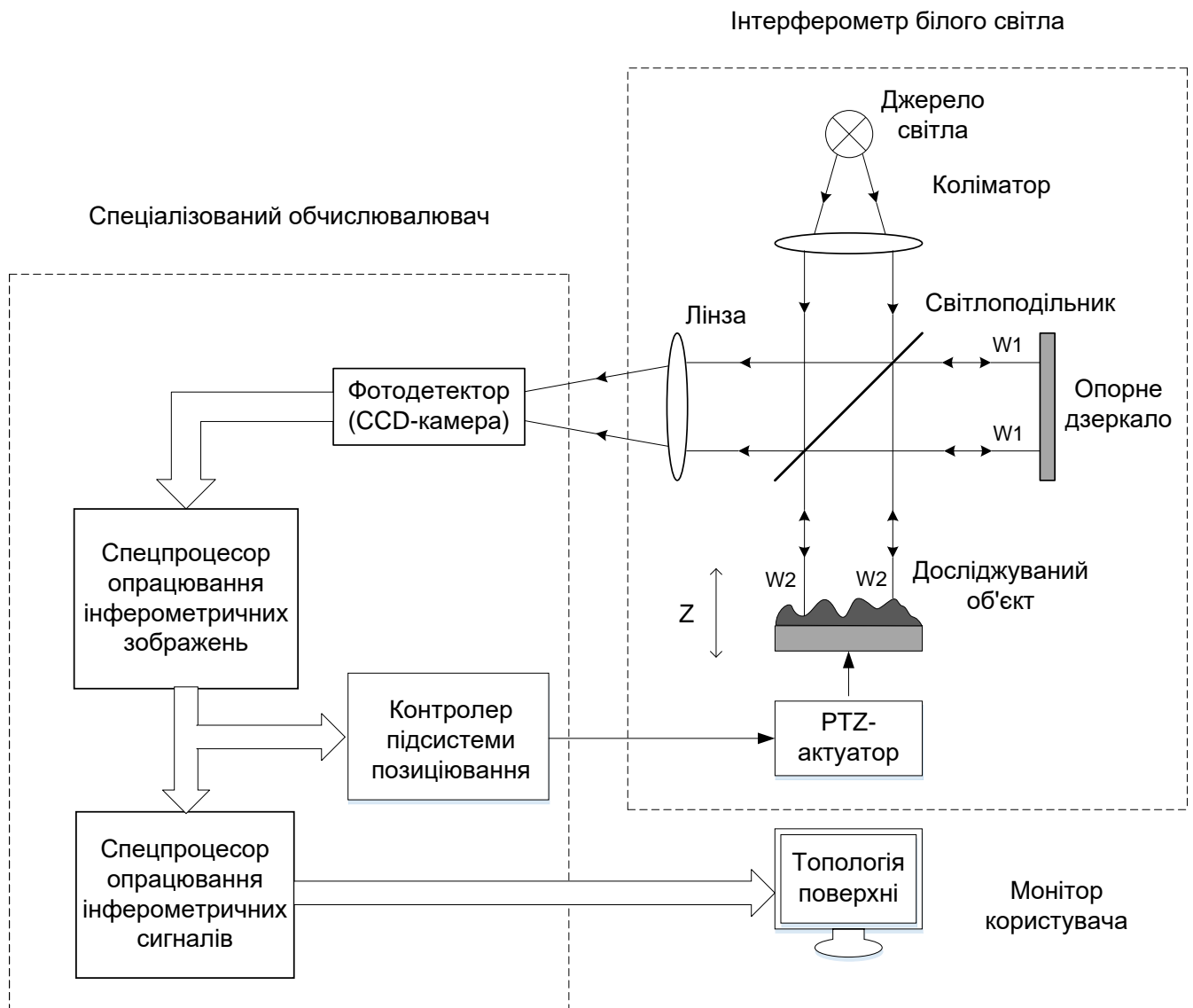


Рисунок 1. Структура комп'ютерної системи ІБС

Опрацювання зареєстрованих в CCD-камері та оцифрованих інтерферограм білого світла здійснюється у спеціалізованому обчислювачі у два етапи (рис.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, на першому етапі комп'ютеризована система забезпечує підвищення ентропії відібраних інтерферограм та збільшення відношення сигнал/шум.

Другий етап опрацювання інтерферограми підпорядкований виконанню тієї чи іншої виміральної 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.

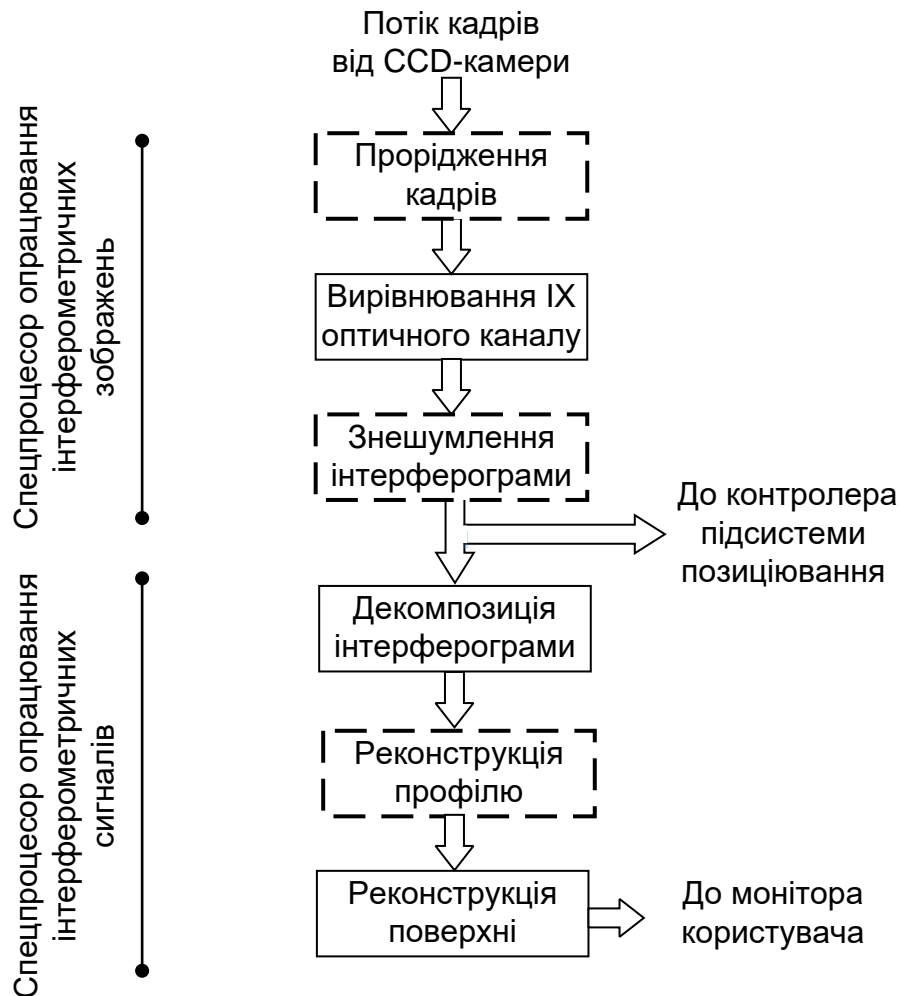


Рисунок 2. Етапи опрацювання даних ІБС у спеціалізованому обчислювачі

У багатьох випадках така комп'ютерна система може експлуатуватися не лише 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.

Науково-прикладна задача дисертаційної роботи полягає у розробленні методів, придатних 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.

Розроблено модель спотворень вимірювального каналу інтерферометра та доведено необхідність застосування обчислювальних засобів для компенсації оптичних спотворень і знешумлення інтерферограм.

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, яке залежить 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 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 у сучасних обчислювальних засобах реалізуються через додавання і множення із використанням наближених чисельних та ітеративних методів, як наприклад, метод Ньютона-Рафсона для ділення або розклад функцій у ряд Тейлора (логарифм, арккосинус, арктангенс, квадратний корінь). Дослідження показали, що прийнятна для інтерферометрії точність обчислень досягається за 5 кроків ітерацій та 5 членів ряду Тейлора.

Для оцінювання точності застосовано зведену і середньоквадратичну похибки реконструкції:

$$\gamma = \frac{|h_{rec} - h_{origin}|}{\max(h_{origin}) - \min(h_{origin})} \cdot 100\% ; \quad \sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [h_{rec}(i) - h_{origin}(i)]^2}}{N \cdot [\max(h_{origin}) - \min(h_{origin})]} \cdot 100\% \quad (3)$$

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

Розроблено методологію дослідження, 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.

**Третій 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 частотної 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 огинаючої 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.

Наявність у інтерферограмі білого світла огинаючої амплітуди  $E(T)$ , що описується функцією Гауса, ускладнює завдання реконструкції профілю поверхні. Для забезпечення інваріантності результатів реконструкції до впливу огинаючої амплітуди застосовано нормалізацію інтерферограми (метод НІ). Суть цього підходу полягає у визначенні форми огинаючої амплітуди і нормуванні інтерферограми за формулою:

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

де  $I_{norm}(n)$  – унормований сигнал інтенсивності;  $n$  – номер вибірки сигналу;  $\tilde{E}(T)$  – оцінка огинаючої амплітуди сигналу інтенсивності;  $T_n$  – значення інформативного параметра у  $n$ -ій точці сигналу інтенсивності.

Щоб визначити оцінку огинаючої амплітуди, застосовано спосіб інтерполяції кубічним сплайном екстремальних точок сигналу інтенсивності, які знаходяться шляхом чисельного диференціювання. Інформативний параметр  $T_n$  із рівняння (5) можна обчислити за допомогою функції арккосинус

$$T_n = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \pi} \arccos[I_{norm}(n)]. \quad (5)$$

На шляху застосування цього підходу розв'язано задачі неоднозначності функції арккосинус на інтервалі її визначеності та розгортання фази. Крім того, застосовано локальне масштабування для коригування лише тих фрагментів сигналу інтенсивності, значення яких навіть після унормування за модулем більші 1.

Для оцінювання обчислювальної ефективності підраховано кількість додавань і множень необхідних для реконструкції профілю поверхні із одного рядка інтерферограми, яка передбачає обчислення кубічного сплайну ( $p=3$ ), функції арккосинус та операцію ділення

$$O(HI) = O(interp) + N \cdot O\left(\frac{1}{x}\right) + N \cdot O(\arccos) \approx 3N \cdot (p + i + k - 1) = 36 \cdot N, \quad (6)$$

де  $i$  та  $k$  – відповідно кількість кроків ітерацій під час виконання ділення та кількість членів у ряді Тейлора. Метод НІ забезпечує найвищу точність реконструкції – зведена похибка  $\gamma$  не перевищує 0,5 %, а середньоквадратична  $\sigma=0,03\%$

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 (рис. 3). Коефіцієнти поліному визначаються на етапі калібрування вимірювального каналу інтерферометра. Метод ПА забезпечує найвищу обчислювальну ефективність (6 д+м/піксель) і досить високу точність реконструкції ( $\gamma=0,8\%$ ,  $\sigma=0,2\%$ ).



Рисунок 3. Послідовність обчислень для реконструкції профілю поверхні за методом посегментної апроксимації

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.

На першому кроці формується матриця Тепліца із поточного  $I_n$  та трьох наступних значень вибірок сигналу інтерферограми

$$\begin{pmatrix} I_{n+1} & I_n \\ I_{n+2} & I_{n+1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{n+2} \\ I_{n+3} \end{pmatrix} \quad (7)$$

На основі розв'язку матричного рівняння (7) визначаються коефіцієнти

$$A_{1n} = \frac{I_n \cdot I_{n+3} - I_{n+1} \cdot I_{n+2}}{I_{n+1}^2 - I_n \cdot I_{n+2}}, \quad A_{2n} = \frac{I_{n+2}^2 - I_{n+1} \cdot I_{n+3}}{I_{n+1}^2 - I_n \cdot I_{n+2}} \quad (8)$$

характеристичного рівняння

$$z^2 + A_{1n} \cdot z + A_{2n} = (z - z_1) \cdot (z - z_2) = 0. \quad (9)$$

Корені цього рівняння

$$z_{n1,n2} = -\frac{A_{1n}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A_{1n}}{2}\right)^2 - A_{2n}} \quad (10)$$

дають можливість визначати поточні значення несучої частоти

$$f_n = \frac{1}{2\pi\Delta} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(z_n)}{\operatorname{Re}(z_n)}, \quad (11)$$

а далі розрахувати різницю оптичного шляху в окремих точках поверхні

$$T_n = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Phi(T) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \operatorname{cumsum} [2\pi \Delta f_n]. \quad (12)$$

Результати досліджень показали задовільні результати щодо точності реконструкції профілю ( $\sigma_\gamma=1,0\%$ ) та обчислювальної ефективності (88 м+д/піксель). Виявлено обчислювальні проблеми під час реконструкції сферичної поверхні у центральній частині, проте існує можливість ефективного поєднання цього методу із безпосереднім визначенням інформативного параметра із фази сигналу інтенсивності, оскільки у центральній частині негативний вплив огинаючої амплітуди інтерферограми є мінімальним.

Проаналізовано можливість застосування моделі аналітичного сигналу до інтерферограми білого світла. 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 перевищує 1500, причому існує можливість розпаралелення лише по рядках.

Найвищу обчислювальну ефективність і точність забезпечує новий метод реконструкції із логарифмованого аналітичного сигналу інтенсивності, одержаного за допомогою дискретного перетворення Гільберта

$$\dot{I}(T) = I(T) + j \cdot I_Q(T) = \tilde{E}(T) \cdot e^{j \cdot \tilde{\Phi}(T)}, \quad (13)$$

де  $\tilde{E}(T)$  і  $\tilde{\Phi}(T)$  - оцінки огинаючої амплітуди і повної фази сигналу інтерферограми. Логарифмування комплексного аналітичного сигналу (13)

$$\ln[\dot{I}(T)] = \ln[\tilde{E}(T) \cdot e^{j \cdot \tilde{\Phi}(T)}] = \underbrace{\ln[\tilde{E}(T)]}_{real} + \underbrace{j \cdot \tilde{\Phi}(T)}_{imag} \quad (14)$$

дає змогу із уявної частини виразу (14) визначити інформативний параметр

$$T = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \pi} \cdot \operatorname{Im}[\ln(\dot{I})]. \quad (15)$$

Виявлено обмеження точності дискретного перетворення Гільберта стосовно інтерферограми сферичної поверхні, що проявляється у накладанні у області нижніх частот, що відповідає центральній частині інтерферограми, спектрів несучої та огинаючої сигналу інтенсивності (рис. 4).

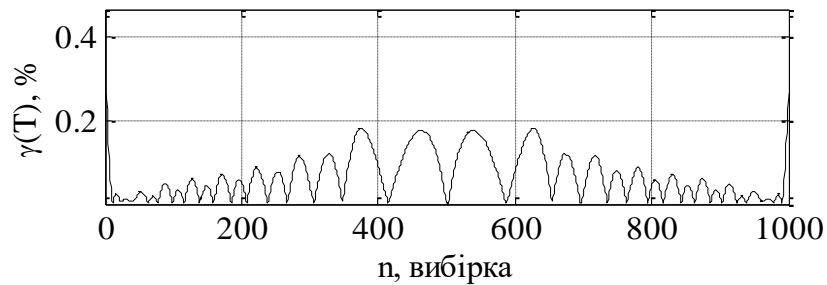


Рисунок 4. Зведена похибка реконструкції профілю сферичної поверхні на основі центрального рядка інтерферограми

У четвертому розділі розроблено процедуру перенесення методів реконструкції із 2D розмірності (реконструкції профілю) на 3D розмірність (реконструкція топології).

На основі результатів виконаних досліджень подано порівняльну характеристику розроблених методів (табл. 1).

Таблиця 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

Одним із завдань спецпроцесора оброблення інтерферометричних зображень є зменшення обсягу даних, які передаються на наступну стадію обробки в спецпроцесор реконструкції топології поверхні (рис. 2). У роботі розроблено новий високоефективний алгоритм прорідження кадрів, суть якого полягає у відборі із послідовності інтерферограм лише тих, які містять істотні зміни. В основі алгоритму лежить логічна операція XOR над найстаршими бітами інтерферометричних зображень, що забезпечує високу ефективність обчислень.

Досліджено застосування цифрових нерекурсивних фільтрів та вейвлет-перетворення для знешумлення інтерферограм і встановлено параметри, за яких досягається підвищення відношення сигнал/шум на 35 дБ.

На основі аналізу особливостей кожного методу реконструкції, оцінки їх обчислювальної ефективності та придатності до розпаралелення, запропоновано доцільні варіанти реалізації на різних обчислювальних платформах. Метод Проні є досить складним з погляду обчислень, а в його основі лежать складні операції, що

може призводити до виникнення суттєвих обчислювальних похибок, наприклад, обчислення погано обумовлених матриць. Проте цей метод придатний до розпаралелення по точках і може бути ефективно реалізований на GPU, відтак всі пікселі можуть опрацьовуватися незалежно кожен на окремому ядрі GPU (рис. 5).

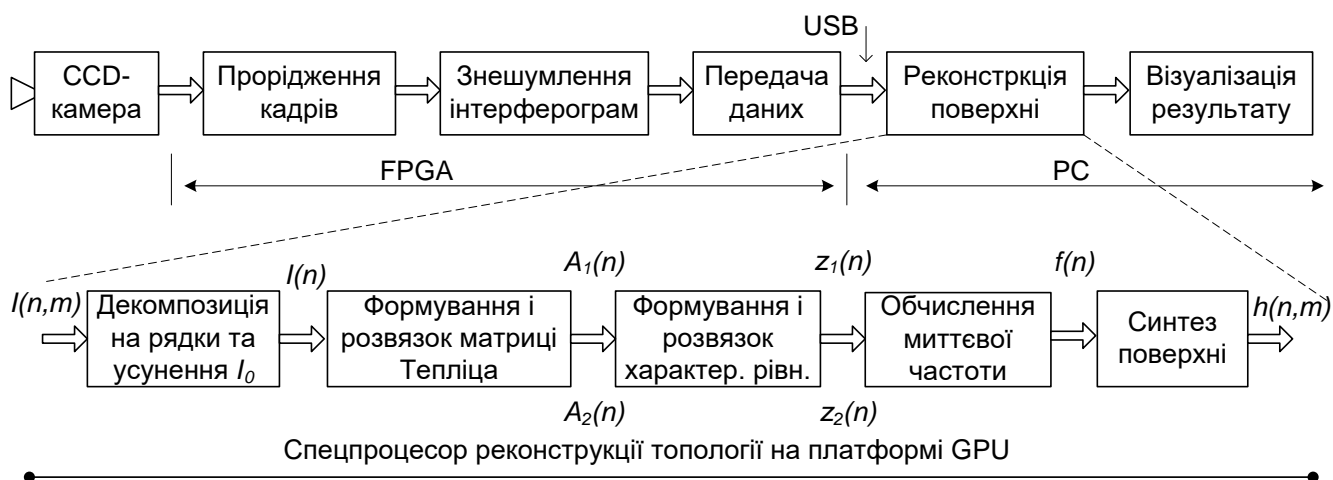


Рисунок 5. Приклад імплементації методу реконструкції топології поверхні на основі моделі Проні на платформі GPU

Методи реконструкції із опрацюванням сигналів у області просторової частоти базуються на дискретному перетворенні Гільберта, яке на практиці реалізується алгоритмами прямого і зворотного швидкого перетворення Фур'є. Подібні обчислення ефективно реалізуються на основі платформ DSP і FPGA. Як приклад, на рис. 6 наведено варіант імплементації методу логарифмування аналітичного сигналу на технології FPGA.

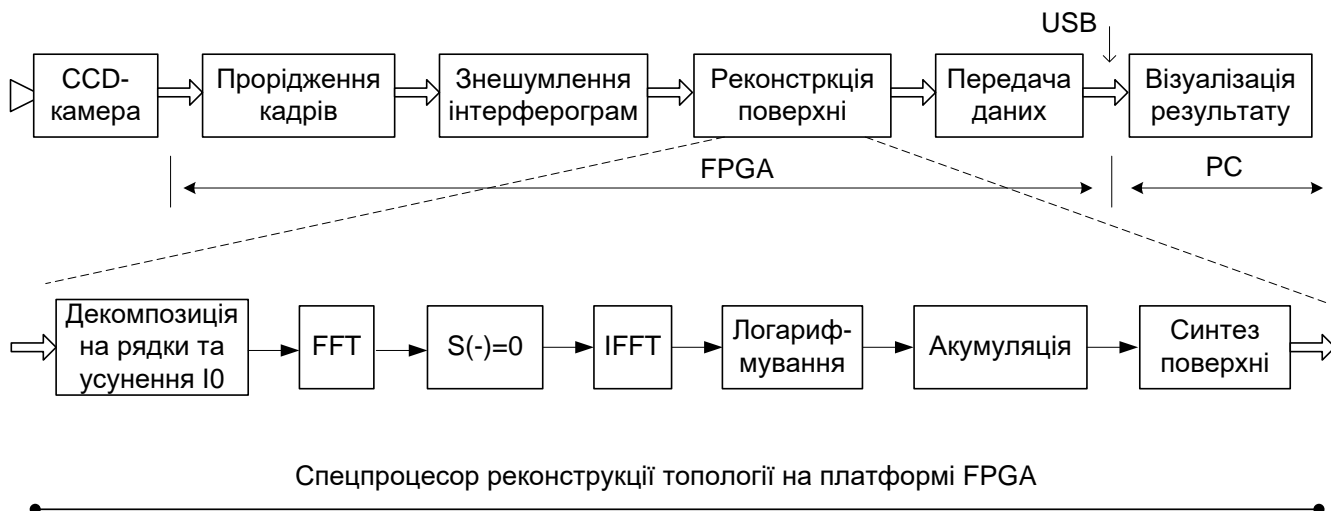


Рисунок 6. Приклади імплементації методу логарифмування аналітичного сигналу для реконструкції топології поверхні

Візуалізація результатів реконструкції зазвичай відбувається на ПК, тому 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.



У додатку А розміщено три акти впровадження результатів дисертаційної роботи. Додаток Б містить коди в програмному пакеті MatLab для досліджень вибраних методів реконструкції профілю і топології синтезованих та реальних поверхонь, результати яких викладені в розділах 3 і 4 дисертації. У додатку В наведено приклад імплементації (код програми та результат виконання) на платформі FPGA найефективнішого у обчислювальному сенсі алгоритму реконструкції сферичної поверхні за методом посегментної апроксимації, що повністю підтверджує результати теоретичних розрахунків. На рис. 7 подано фрагмент копії екрану із симуляції цього алгоритму в пакеті Quartus II.

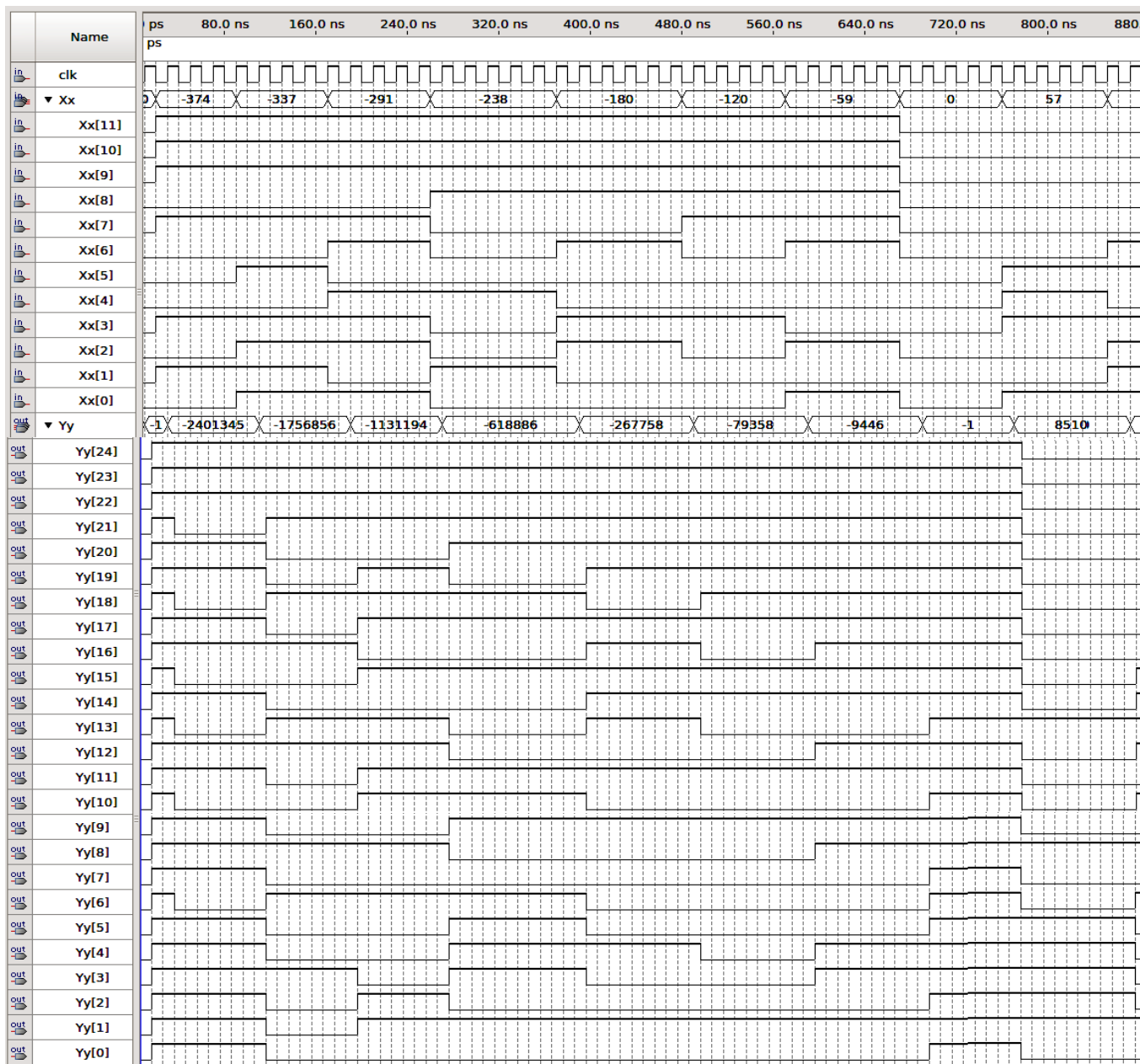


Рисунок 7. Результат симуляції імplementованого на платформі FPGA методу посегментної апроксимації

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА 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 технологіях. 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 НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. 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.
2. Stadnyk V. State and prospects of computerized systems monitoring the topology of surfaces, based on white light interferometry / V. Stadnyk, E. Manske, A. Khoma // Computational Problems of Electrical Engineering. - 2014. - vol. 4, No. 1. - p. 75–80.
3. Стадник Б.І. Способи нормалізації інтерферограми білого світла для реконструкції профілю поверхні / Б.І. Стадник, Хома А.В. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. – 2015. – III (6), Issue 54. – p. 70-73.
4. 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.
5. Yatsyshyn S. Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part 13. Segmental Approximation for Surface Topology Reconstruction / S. Yatsyshyn, V. Stadnyk, E. Manske, A. Khoma // Sensors and Transducers. - 2015.- vol. 195, Issue 12. - p.50-55.
6. Manske E. Metody rekonstrukcji powierzchni z interferogramu światła białego bazujące się na transformacie Hilberta / E. Manske, A. Khoma // Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Elektrotechnika – 2015. – №34 – s. 71-75.
7. Хома А.В. Дослідження методів знешумлення інтерферограми білого світла / А.В. Хома // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2015. – №76. – с. 74–80.
8. Wrzuszczak M. Badanie dokładności rekonstrukcji powierzchni z interferogramu światła białego z wykorzystaniem metod bazujących na transformacie Hilberta / M. Wrzuszczak, A. Khoma // Przegląd Elektrotechniczny – 2016. – №4 – s. 210-215.
9. Хома А.В. Розроблення та дослідження методу реконструкції поверхні на основі інтерферограми білого світла / А.В. Хома // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of

- Measurement-2015»: Тези доповідей. – Славське, 2-6 лютого 2015 р. - с. 141-144.
10. Стадник Б., Хома А. Застосування методу Проні для реконструкції топології поверхні із інтерферограми білого світла / Б. Стадник, А. Хома // II Міжнародна науково-практична конференція «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи»: Тези доповідей. - Львів, 28-30 травня 2015 р. – с. 222-224.
11. Хома А.В. Застосування вейвлет-перетворення для знешумлення інтерферограм білого світла / А.В. Хома // III Міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах-2015»: Тези доповідей. – Вінниця, 27-29 жовтня 2015 р. – с. 16.

## АНОТАЦІЯ

**Хома А.В. Методи та засоби комп'ютерного опрацювання сигналів інтерферометрії білого світла.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-прикладної задачі — розробленню нових і вдосконаленню відомих методів реконструкції топології складних поверхонь із однієї інтерферограми білого світла.

Набула подальшого розвитку концепція ефективного використання і розподілу обчислювальної потужності для опрацювання даних в комп'ютерній системі інтерферометрії білого світла. За розробленою концепцією перший спецпроцесор здійснює відбір інформативних інтерферометричних зображень із зареєстрованих CCD-камерою кадрів, знешумлює їх та компенсує вплив оптичних спотворень. Другий спецпроцесор виконує реконструкцію топології поверхні зі змінними параметрами на основі опрацювання кожної окремої інтерферограми за розробленими новими і вдосконаленими відомими методами.

Обґрунтовано критерії оцінювання обчислювальної ефективності та точності методів реконструкції, за допомогою яких підтверджено ефективність розроблених методів. Виконано реконструкцію лінійних і сферичних поверхонь, одержаних у ході інтерферометричних вимірювань реальних об'єктів.

На основі аналізу властивостей розроблених методів реконструкції подано ефективні варіанти імплементації розроблених методів реконструкції топології поверхні на таких обчислювальних платформах як FPGA, GPU та DSP. Реалізація розроблених методів забезпечує необхідну для інтерферометрії обчислювальну ефективність і точність реконструкції нелінійних поверхонь зі змінними параметрами, що знаходять застосування у багатьох сферах науки і технологій.

**Ключові слова:** інтерферометрія білого світла, сигнал інтенсивності, нелінійні поверхні зі змінними параметрами, метод реконструкції топології поверхні, модель Проні, перетворення Гільберта, обчислювальна ефективність, точність реконструкції, імплементація на основі FPGA, GPU, DSP.

## АННОТАЦИЯ

**Хома А.В. Методы и средства компьютерной обработки сигналов**

**інтерферометрії білого світла.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению важной научно-прикладной задачи - разработке новых и совершенствованию известных методов реконструкции топологии сложных поверхностей с одной интерферограммы белого света.

Получила дальнейшее развитие концепция эффективного использования и распределения вычислительной мощности для обработки данных в компьютерной системе интерферометрии белого света. Согласно разработанной концепции первый спецпроцессор осуществляет отбор информативных интерферометрических изображений из зарегистрированных CCD-камерой кадров, подавляет шум и компенсирует влияние оптических искажений. Второй спецпроцессор выполняет реконструкцию топологии поверхности с переменными параметрами на основе обработки каждой отдельной интерферограммы с использованием разработанных новых и усовершенствованных известных методов.

Обоснованы критерии оценки вычислительной эффективности и точности методов реконструкции, с помощью которых подтверждена эффективность разработанных методов. Выполнена реконструкция линейных и сферических поверхностей, полученных из интерферограмм реальных объектов.

На основе анализа свойств разработанных методов реконструкции предложены эффективные варианты имплементации разработанных методов реконструкции топологии поверхности на таких вычислительных платформах как FPGA, GPU и DSP. Реализация разработанных методов обеспечивает необходимую для интерферометрии вычислительную эффективность и точность реконструкции нелинейных поверхностей с переменными параметрами, которые находят применение во многих сферах науки и технологий.

**Ключевые слова:** интерферометрия белого света, сигнал интенсивности, нелинейные поверхности с переменными параметрами, метод реконструкции топологии поверхности, модель Прони, преобразование Гильберта, вычислительная эффективность, точность реконструкции, имплементация на основе FPGA, GPU, DSP.

## ABSTRACT

**Khoma A.V. Methods and means of computer signal processing of white light interferogram.** –On the rights of manuscript.

This thesis submitted for the scientific degree of candidate of technical sciences (PhD in Engineering) in specialty 05.13.05 – computer methods and components. – Lviv Polytechnic National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The thesis is devoted to solve actual applied scientific task of development and improvement of topology reconstruction methods for complex surface based from one white light interferogram. In the work a specificity of surface reconstruction task based on WLI is described, known methods of interferogram processing are analyzed and their

suitability for the nonlinear surface topology reconstruction of dynamic objects are assessed.

The concept of efficient use and distribution of computing power for data processing in a white light interferometry computer system was further developed. In the developed concept a special first processor selects informative interferometric images recorded with CCD-camera shots, and compensates an influence of optical distortion. A second special processor performs surface topology reconstruction with variable parameters based on the processing of each individual interferogram with help of developed methods.

A novel high efficiency reconstruction method of complex topology surfaces is developed, the main idea of which is reversal of an interferometry channel transformation function and applying computationally simple methods of polynomial approximation for individual white light interferogram segments. Research has shown that this method combines the highest computational efficiency and accuracy.

For the first time WLI signal decomposition was made for complex exponents, allowing us to apply Prony model for determination of the optical path difference and for nonlinear surface profile reconstruction. Although the method is computationally difficult it is suitable for complete computation parallelization.

The reconstruction method based on total phase determination of the normalized WLI signal carrier frequency was improved. The distinctive feature of this method is the use of interpolation for the interferogram amplitude envelope measurement as well as the resolution of arc cosine function ambiguity problem. The method provides the highest accuracy and is computationally effective.

Methods of surface profile reconstruction in the field of spatial frequency based on the discrete Fourier and Hilbert transforms were researched and developed. Although reconstruction methods associated with instantaneous WLI signal phase calculation although are difficult, they still provide acceptable reconstruction accuracy.

Procedure of reconstruction methods transferring from 2D (reconstruction profile) to a 3D (reconstruction topology) was processed. Highly-performance frame thinning algorithm was developed, that reduces computational costs and allows transient processes investigation using WLI. The possibility of using non-recursive digital filter and wavelet transform for noise reduction in WLI (signal / noise ratio increased by 35 dB) was shown.

The effectiveness of the developed methods for real white light interferogram processing is confirmed. Linear and spherical surfaces obtained during interferometric measurements of real objects were reconstructed.

Based on the properties analysis of developed topology surface reconstruction methods their effective implementation in computing platforms such as FPGA, GPU and DSP was proposed.

**Key words:** white light interferometry, signal of interferogram intensity, nonlinear surface with variable parameters, reconstruction method of surface topology, model Prony, Hilbert transform, computational efficiency, accuracy reconstruction, implementation based on FPGA, GPU, DSP.