КОТОВ МИХАЙЛО МИКОЛАЙОВИЧ. Назва дисертаційної роботи: "ДИФРАКЦІЙНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНОГО ХВИЛЬОВОГО ФРОНТУ"

Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет

імені Тараса Шевченка

На правах рукопису

КОТОВ МИХАЙЛО МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 535.42:681.785, 778.38:535

ДИФРАКЦІЙНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

ОПТИЧНОГО ХВИЛЬОВОГО ФРОНТУ

Спеціальність 01.04.05 - оптика, лазерна фізика

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник

Курашов Віталій Наумович,

к.ф.-м.н., доцент

Київ - 2015

2

ЗМІСТ

Список умовних позначень, символів, скорочень................................................... 4

Вступ............................................................................................................................. 5

Розділ 1 МЕТОДИ АНАЛІЗУ ХВИЛЬОВОГО ФРОНТУ..................................... 15

1.1. Сенсори оптичного хвильового фронту ...................................................... 16

1.1.1. Інтерферометри зсуву............................................................................. 16

1.1.2. Сенсор хвильового фронту Шека-Хартмана........................................ 20

1.1.3. Сенсор Шека-Хартмана з матрицею голографічних мікролінз ......... 24

1.1.4. Дифракційний сенсор хвильового фронту на основі ефекту Талбота30

1.2. Відновлення хвильового фронту за його локальними нахилами.............. 32

1.3. Методи нівелювання впливу спекл-поля при визначенні фазових

спотворень хвильового фронту ..................................................................... 40

Розділ 2 ГОЛОГРАФІЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЬОВОГО

ФРОНТУ У СПЕКЛ-ПОЛЯХ................................................................................... 44

2.1. Голографічні методи вимірювання фазових спотворень хвильового

фронту .............................................................................................................. 45

2.1.1. Голографічний сенсор хвильового фронту .......................................... 45

2.1.2. Ітераційний метод розширення вимірювального діапазону

голографічного сенсора хвильового фронту Шека-Хартмана ..................... 55

2.2. Голографічні методи вимірювання аберацій у спекл-полях ..................... 61

2.2.1. Вплив структури дифузних об’єктів на характеристики розсіяного

випромінювання................................................................................................ 61

2.2.2. Вплив спекл-поля на точність відновлення хвильового фронту за

допомогою сенсора Шека-Хартмана .............................................................. 76

2.2.3. Ітераційний метод вимірювання аберацій у спекл-полях................... 81

2.3. Вимірювання деформацій шорстких поверхонь методом послідовних

ітерацій............................................................................................................. 85

Висновки до розділу 2. ......................................................................................... 88

3

Розділ 3 ЕФЕКТ ТАЛБОТА У ПУЧКАХ З АБЕРАЦІЯМИ ................................. 90

3.1. Дифракційна модель зміни структури оптичного поля розсіяного

структурованими об’єктами........................................................................... 91

3.1.1. Зміна амплітудного розподілу оптичного випромінювання в площині

Талбота ............................................................................................................... 91

3.1.2. Ефект Талбота за наявності аберацій.................................................... 94

3.2. Фізичні обмеження сенсора хвильового фронту на ефекті Талбота. ....... 98

3.2.1. Порівняльний аналіз сенсора на ефекті Талбота та сенсора ШекаХартмана. ........................................................................................................... 99

3.2.2. Вплив апертурних ефектів на точність відновлення хвильового

фронту. ............................................................................................................. 104

3.2.3. Роль профілю дифракційних ґраток у вимірюванні фазових

спотворень хвильового фронту. .................................................................... 114

3.3. Висновки до розділу 3. ................................................................................ 121

Розділ 4 АДАПТИВНИЙ СЕНСОР ХВИЛЬОВОГО ФРОНТУ НА ОСНОВІ

ЕФЕКТУ ТАЛБОТА ............................................................................................... 123

4.1. Ефект самовідтворення прямокутної ґратки астигматичним хвильовим

фронтом.......................................................................................................... 123

4.2. Моделювання сенсора Талбота з адаптацією дифракційної ґратки до

кривизни хвильового фронту....................................................................... 125

4.3. Адаптивний сенсор хвильового фронту з РК просторовим модулятором

світла............................................................................................................... 131

Висновки до розділу 4. ....................................................................................... 140

ВИСНОВКИ............................................................................................................. 141

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛСТАНИХ ДЖЕРЕЛ............................. 143

4

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ

АОД акустооптичний дефлектор

ГЛ голографічна лінза

ГМЛ голографічна матриця мікролінз

ГОЕ голографічні оптичні елементи

ДГ дифракційна ґратка

ДЛ дифракційна лінза

ДОЕ дифракційні оптичні елементи

ДС дифракційна структура

ІЧ інфрачервоний

КДД кутовий динамічний діапазон

ММЛ матриця мікролінз

ОПФ оптична передаточна функція

ПЗЗ прилад з зарядовим зв’язком

ПК персональний комп’ютер

ПМ просторовий модулятор світла

РК рідкокристалічний

СШХ сенсор Шека-Хартмана

ФО фазовий об’єкт

ФРТ функція розсіювання точки

ХФ хвильовий фронт

He-Ne гелій-неоновий

TFT LCD рідкокристалічний екран на тонкоплівкових

транзисторах (thin-film transistor liquid-crystal display)

VGA компонентний відеоінтерфейс стандарту VGA

2D двовимірний (two-dimensional)

5

ВСТУП

Актуальність теми. Задача визначення форми хвильового фронту є

актуальною у багатьох галузях сучасної прикладної оптики: для безконтактного

тестування об’єктів у метрології [1], в офтальмології для визначення аберацій

ока та їх корекції [2, 3], для відновлення зображення у астрономічних

дослідженнях [4], а також для досліджень нелінійних ефектів [5] та оптичних

вихорів [6, 7].

При побудові адаптивних систем часто необхідно визначати аберації

високих порядків. Так, у надсучасних телескопах, які використовуються,

зокрема, для виявлення екзопланет, для компенсації атмосферної

турбулентності застосовуються системи з масивом у 30×30 і, навіть, 44×44

коригуючих елементів [8]. Така точність може бути досягнута лише за

використання когерентних джерел світла. Так, в астрономічних дослідженнях з

цією метою використовується штучна зірка гідування, яка створюється шляхом

збудження лазерним пучком атомів натрію у мезосфері [9].

Методи вимірювання форми хвильового фронту базуються на

перетворенні вихідного поля, внаслідок якого виникає залежність інтенсивності

світла на виході приладу-аналізатора від функції фази вхідної хвилі. Одним з

найпоширеніших інструментів для вимірювання оптичного хвильового фронту

є сенсор Шека-Хартмана [10]. Основними елементами такого сенсора є

двовимірний масив мікролінз та координатно-чутливий фотоприймач. Зміна

фази вхідної хвилі призводить до зміщення сфокусованих на фотодетекторі

світлових плям пропорційно до зміни нахилу хвильового фронту, усередненого

за апертурою відповідної мікролінзи. Таким чином, зазначений сенсор вимірює

градієнт фази хвильового фронту, а його робота, фактично, розглядається з

точки зору геометричної оптики.

Використання когерентних джерел світла може призводити до

негативного впливу явищ дифракції на якість зображення у площині

6

вимірювання [11]. Наприклад, при зменшенні діаметра мікролінз у сенсорі

Шека-Хартмана точки у фокальній площині будуть розмиватись, а внаслідок

дрібних випадкових флуктуацій фази у досліджуваному пучку зображення в

площині спостереження буде зашумлюватись спеклами [12]. Відповідно,

існуючі методи потребують детальної дифракційної інтерпретації з метою

наблизити процедуру вимірювань до реальних умов. Це дозволяє розширити

діапазон застосування відомих методів, наприклад, для дослідження

деформацій шорсткої поверхні.

Існують також методи визначення фази хвильового фронту, які мають

суто дифракційну природу, наприклад, основані на ефекті Талбота. Сам ефект

полягає в тому, що зображення періодичної структури при освітленні її

плоским монохроматичним пучком світла завдяки інтерференції дифрагованих

хвиль самовідновлюється без допомоги будь-якої оптичної системи на певній

відстані, т.зв. відстані або довжині Талбота [13]. Якщо ж освітлювати

двовимірну дифракційну ґратку неплоским пучком, то для невеликих варіацій

фазових спотворень локальні зміщення френелівських зображень ґратки

можуть бути співставленні з локальними нахилами досліджуваного хвильового

фронту. Відхилення у площині Талбота відновленого зображення ґратки від

початкового пропорційні фазовим відхиленням хвильового фронту, який

освітлює ґратку [14]. Таким чином, алгоритм роботи такого сенсора хвильового

фронту дуже подібний до роботи сенсора Шека-Хартмана, проте тут відсутнє

дифракційне розмиття точок у площині вимірювання [15]. На жаль, при

збільшені кривизни хвильового фронту зображення ґратки у площині

самовідтворення все ж буде погіршуватись. У роботі [16] експериментально

показано, що вимірювальний діапазон залежатиме від скважності ґратки. Проте

поза увагою лишились питання, пов’язані з іншими просторовими

характеристиками ґратки (форма отворів та її розмір). Між іншим, скінченність

ґратки призводить до розмиття зображення в площині самовідтворення,

особливо на краю апертури. Також не розглянуте питання впливу аберацій

хвильового фронту на якість самовідтворення зображення у площині Талбота.

7

Отже, актуальність теми цієї роботи визначається фундаментальним

значенням дифракції як фізичного явища, що лежить в основі перспективних та

високоточних методів дослідження оптичних хвильових фронтів.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота

виконана в науково-дослідній лабораторії оптичної і мікрохвильової обробки

інформації та теорії середовищ факультету радіофізики, електроніки та

комп’ютерних систем Київського національного університету імені Тараса

Шевченка. Її результати отримано в рамках базових фундаментальних та

прикладних досліджень за темами:

- «Енергетично ефективні методи передачі та обробки сигналів НВЧ та

оптичного діапазонів», № держреєстрації 0101U002878 (фундаментальна).

Автором проаналізовано існуючі методи дослідження хвильового фронту.

Головну увагу приділено сенсору Шека-Хартмана та його модифікаціям:

теоретичному та експериментальному обґрунтуванню цієї методики,

встановленню її граничних можливостей (динамічного діапазону, чутливості,

тощо). Проведено порівняння сенсора Шека-Хартмана з

інтерферометричними методами.

- «Розробка фізичних основ приладів та програмно- апаратних комплексів для

радіофізичних систем енергокомплексу», № держреєстрації 0106U006544

(прикладна). Автором розроблено оптичну схему та основні вимоги до

установки адаптивного сенсора хвильового фронту, заснованого на

ітераційному методі реєстрації матриць голографічних мікролінз залежно від

динаміки змін хвильового фронту у часі;

- «Розробка фізичних основ приладів і програмно-апаратних комплексів для

радіофізичних систем енергокомплексу з покращеними характеристиками

елементів», № держреєстрації 0109U004210 (прикладна). Автором

розроблено оптичну схему та основні вимоги до створення лабораторного

макета сканера хвильового фронту з обробкою поляризаційної інформації

для дослідження поверхні.

8

- «Фундаментальні основи новітніх та ресурсозберігаючих технологій на

основі радіофізики та електроніки», № держреєстрації 0106U006625

(фундаментальна). Автором було досліджено можливість застосування

голографічних елементів для компенсації впливу спеклів при детектуванні

оптичного хвильового фронту. Розроблено метод ітераційного запису

голографічної матриці мікролінз сенсора хвильового фронту Шека-Хартмана.

Показано, що він покращує параметри та розширює функціональні

можливості сенсора. Визначено можливість його використання для

відновлення хвильових фронтів за наявності спекл-поля.

- «Фундаментальні основи створення та методи дослідження нанорозмірних

структур з керованими параметрами для потреб енергокомплексу»,

№ держреєстрації 0111U006169 (фундаментальна). Автором теоретично

визначені та експериментально перевірені умови та обмеження коректного

використання ефекту Талбота в сенсорах оптичного хвильового фронту.

Проведено теоретичний та експериментальний аналіз впливу скінченності

вхідної апертури сенсора Талбота на точність відновлення хвильового

фронту, вказано методи його мінімізації. Запропоновано та

експериментально продемонстровано новий метод вимірювання хвильового

фронту, що ґрунтується на спостереженні ефекту Талбота при адаптації

дифракційної ґратки до аберації досліджуваної хвилі.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи було:

1. Дослідження впливу спекл-поля на відновлення форми хвильового фронту

та вимірювання аберацій за його наявності із застосуванням методів

дифракційної оптики та голографії.

2. Теоретичний і експериментальний аналіз ефекту Талбота та дослідження

фізичних обмежень щодо його застосування для визначення аберацій

хвильового фронту.

3. Теоретичне обґрунтування використання фізичних особливостей

формування зображення у площинах Талбота для оптимізації вимірювання

9

аберації хвильового фронту та їх експериментальної реалізації в

адаптивному сенсорі на ефекті Талбота.

Для досягнення поставленої мети розв’язувалися наступні задачі:

− Теоретичний аналіз та експериментальні дослідження впливу статистики

випадкових неоднорідностей середовища на формування спеклів у фур’єплощині матриці мікролінз.

− Створення експериментальної установки на основі матриці мікролінз з

«голографічною пам’яттю» для вимірювання аберацій хвильового фронту у

спекл-полі.

− Теоретичне та експериментальне дослідження впливу апертурних ефектів та

форми отворів дифракційної ґратки на якість самовідтвореного зображення

у площині Талбота.

− Дослідження методів адаптації дифракційної ґратки до кривизни хвильового

фронту в сенсорі на основі ефекту Талбота.

Об’єкт дослідження – явище дифракції фазово-неоднорідної оптичної

хвилі на двовимірних голографічних та періодичних дифракційних структурах.

Предмет дослідження – просторові характеристики дифракційних

зображень, що формуються в умовах фазових неоднорідностей досліджуваних

об’єктів.

Методи дослідження:

− теоретичні методи статистичної та кореляційної оптики для аналізу впливу

спеклів на точність визначення форми хвильового фронту;

− голографічні методи відновлення хвильових фронтів для вимірювання

аберацій у спекл-полях;

− фотометричні методи вимірювання центрів мас у гартманограмах та

талботограмах хвильових фронтів для визначення спотворень

досліджуваних оптичних систем;

− числові методи оптимального відновлення фази хвильового фронту за

експериментально отриманими значеннями локальних нахилів;

10

− теоретичний аналіз та комп’ютерне моделювання структури оптичного поля,

розсіяного періодичними об’єктами.

Наукова новизна одержаних результатів визначається наступними

положеннями:

1. Вперше розглянуто вплив статистики випадкових неоднорідностей

об’єкта на формування спеклів у фур’є-площині матриці мікролінз.

2. Вперше використано метод голографічної компенсації аберацій для

вимірювання спотворень хвильового фронту за наявності спекл-поля.

3. Вперше розглянуто вплив скінченності апертури та форми отворів

періодичної ґратки на самовідтворення її зображення у площині Талбота.

4. Вперше запропоновано та досліджено метод адаптації дифракційної

ґратки до кривизни хвильового фронту у площині Талбота для плоскої хвилі.

Шляхом комп’ютерного моделювання реалізовано ітераційний алгоритм

роботи адаптивного сенсора на основі ефекту Талбота. Експериментально

реалізовано ефект самовідтворення у площині Талбота зображення прямокутної

дифракційної ґратки з різним періодом по осях за допомогою астигматичного

хвильового фронту.

5. Вперше запропоновано та експериментально реалізовано двоканальну

вимірювальну систему з розширеними функціями адаптації, в якій сенсор

Шека-Хартмана використовується для попередньої грубої оцінки аберацій

досліджуваного хвильового фронту, а точні вимірювання проводяться

адаптивним сенсором Талбота.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

Використання запропонованого в роботі ітераційного алгоритму роботи

голографічного сенсора дає можливість розробляти оптичні пристрої для

вимірювання в реальному часі змін хвильового фронту за наявності спекл-поля

із забезпеченням необхідної кутової чутливості.

Запропонована в роботі концепція побудови сенсора хвильового фронту

Талбота з адаптацією вимірювального каналу до фазових змін досліджуваної

оптичної хвилі шляхом варіювання просторових параметрів періодичної ґратки

11

може бути основою при створенні принципово нових електронно-оптичних

вимірювальних систем.

Результати проведених досліджень використано під час виконання

договірних прикладних науково-дослідних робіт:

- «Дослідження ефектів когерентності вищих порядків при лінійних та

нелінійних перетвореннях оптичних полів», № держреєстрації 0105U008450,

договір № Ф10/30-2005, замовник – Міністерство освіти і науки України –

при дослідженні деформацій шорсткої поверхні за допомогою ітераційного

методу запису голографічної матриці мікролінз з метою адаптації сенсора

Шека-Хартмана до вимірювань за наявності спекл-поля.

- «Розроблення та створення голографічного сенсора хвильового фронту для

діагностики зору людини», № держреєстрації 0105U008451, договір

№ ДЗ/171-2005, замовник – Міністерство освіти і науки України – при

розробці технічних вимог до голографічного сенсора хвильового фронту та

пропозицій до конструктивного виконання сенсора для співвиконавця, а

також при розробці оптичної схеми та основних вимог до установки для

виготовлення матриць голографічних мікролінз з попередньою компенсацією

заданих аберацій;

Результати роботи можуть бути також використані при розробці нових та

модернізації існуючих методів вимірювання фази хвильового фронту та

параметрів оптичних елементів.

Особистий внесок здобувача

У працях, виконаних у співавторстві, особистий внесок автора полягає

переважно у проведенні комп’ютерного моделювання, експериментальних

вимірювань, обробці результатів вимірювань, обговоренні результатів та їх

інтерпретації. Зокрема:

- в роботі [17] автором сконструйовано лабораторний макет голографічного

сенсора Шека-Хартмана;

12

- в роботі [18, 19] автором експериментально реалізовано ітераційний метод

розширення вимірювального діапазону сенсора Шека-Хартмана шляхом

послідовної реєстрації матриць голографічних мікролінз;

- в роботі [20] автор експериментально дослідив можливість використання

ітераційного алгоритму роботи сенсора Шека-Харманна з матрицею

голографічних мікролінз для визначення аберацій хвильового фронту за

наявності спекл-поля;

- в роботі [21] автором експериментально досліджуються деформацій

шорсткої поверхні за допомогою сенсора Шека-Харманна з мартрицею

голографічних мікролінз;

- в роботі [22] автором експериментально досліджено вплив статистичних

характеристик спекл-поля на точність відновлення форми хвильового фронту

сенсором Шека-Хартмана;

- в роботі [23] автором експериментально досліджено зв’язок періоду вхідної

ґратки із вимірювальним діапазоном сенсора Талбота;

- в роботах [24, 25] автором проведено експериментальне порівняння сенсора

хвильового фронту, основаного на ефекті Талбота, із сенсором ШекаХартмана;

- в роботі [26, 27] автором за допомогою числових методів та

експериментально досліджений вплив розміру вхідної апертури на якість

самовідтворення зображення вхідної ґратки та на точність вимірювань

сенсора хвильового фронту, що використовує ефект Талбота;

- в роботі [28, 29] автором за допомогою числових методів та

експериментально досліджений вплив просторових характеристик (таких як

форма отворів та скважність) двовимірної періодичної ґратки на

самовідтворення її зображення у площині Талбота та на вимірювальні

характеристики сенсора хвильового фронту, основаного на ефекті Талбота;

- в роботі [30] автором за допомогою комп’ютерного моделювання досліджено

роботу адаптивного сенсора хвильового фронту на основі ефекту Талбота на

прикладі сферичної та астигматичної хвиль.

13

- в роботах [31, 32] автором експериментально досліджено роботу адаптивного

сенсора хвильового фронту на основі ефекту Талбота з просторовим

модулятором світла.

Апробація результатів дисертації:

Основні положення дисертаційної роботи доповідались на 14

міжнародних конференціях та семінарах:

- I International Conference «Electronics and Applied Physics»: 24-27 Nov. 2005,

Kyiv, Ukraine.

- VI International Young Scientists’ Conference on Applied Physics: 14-16 June.

2006, Kyiv, Ukraine.

- 8th International Conference on Correlation Optics: 11-14 Sep. 2007, Chernivtsy,

Ukraine.

- XI International Young Scientists’ Conference on Applied Physics: 15-18 June

2011, Kyiv, Ukraine.

- XII International Young Scientists’ Conference on Applied Physics: 23-26 June

2012, Kyiv, Ukraine.

- XIII International Young Scientists’ Conference on Applied Physics: 12-15 June

2013, Kyiv, Ukraine.

- 10th International Conference on Correlation Optics: 12 – 16 Sep. 2011,

Chernivtsi, Ukraine.

- 11th International Conference on Correlation Optics: 18 – 21 Sep. 2013,

Chernivtsi, Ukraine.

- 6

th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL'2013 : 9-13 Sep.

2013, Sudak, Ukraine.

- XIV International Young Scientists’ Conference on Applied Physics: 11-14 June

2014, Kyiv, Ukraine.

- 13-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні

технології управління екологічною безпекою регіонів,

природокористуванням, заходами у надзвичайних ситуаціях»: 29.09–

03.10.2014, Київ, Україна.

14

- 15th International Young Scientists Conference Optics and High Technology

Material Science - SPO 2014: 23- 26 Oct. 2014, Kyiv, Ukraine.

- XV International Young Scientists’ Conference on Applied Physics: 10-13 June

2015, Kyiv, Ukraine.

- 12th International Conference on Correlation Optics: 14 – 18 Sep. 2015,

Chernivtsi, Ukraine.

Публікації

За матеріалами дисертації опубліковано 27 наукових праць, з яких 10

статей у наукових фахових виданнях (з них 4 статті у виданнях, які входять до

міжнародних наукометричних баз даних), 6 публікацій у реферованих

збірниках наукових праць, 10 тез доповідей на наукових конференціях та один

патент України на корисну модель.

Структура та об’єм дисертації.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку

використаних джерел, що містить 99 посилань. Робота ілюстрована 75

рисунками, містить 4 таблиці і має загальний обсяг 155 сторінок.

ВИСНОВКИ

Впершепоказанощопридослідженнікогерентнихпучківізвнесеними

випадковимифлуктуаціямифазирозміриспеклівуполіспостереження

залежатьнелишевідрозмірівапертуриайвідстатистичнихпараметрів

дифузораЗапропонованаоригінальнаоптичнасхемаекспериментуяка

дозволяємоделюватидифузнуповерхнюзкерованимикореляційними

характеристикамиТеоретичнотаекспериментальнопоказанощоточність

визначенняфазихвильовогофронтусенсоромШекаХартманазменшується

призменшеннірадіусукореляціїспеклполя

Впершезапропоновановикористаннядифракційноїоптикидлядослідження

зашумленогоспекламихвильовогофронтущозмінюєтьсяучасі

Використанняматриціголографічнихмікролінздозволилореалізувати

ітераційнийметодвизначеннядеформаційповерхніщорозсіюєсвітло

АналізефектуТалботавпучкахзабераціямипоказавщолокальнізміщення

зображенняуплощиніТалботабудутьпропорційнимидолокальнихнахилів

хвильовогофронтузаумовищохвильовийфронтможевважатисяплоскимв

околірадіусомудваперіодиґраткиЯкнаслідокдляскінченоїґратки

оптимальнаоцінкахвильовогофронтуотримуєтьсязацентральноючастиною

талботограмищоневключаєдвакрайнірядкиотриманогозображенняґратки

Встановленощодлявиконанняумовфазовогосинхронізмудоцільно

застосовуватиґраткизвузькимспектромпросторовихчастот

Показанощонегативнийвпливдифракціїрозмиттязображенняхарактерний

длясенсораШекаХартманавсенсорінаосновіефектуТалботавідсутнійщоє

важливоюперевагоюостанньогоКрімтоговикористаннякратнихтанапівцілих

площинТалботадаєможливістьсуттєворозширитидинамічнийдіапазон

вимірювання



Запропонованоновийпринципадаптаціїсенсорахвильовогофронтунаоснові

ефектуТалботаІдеяметодуполягаєвадаптаціїперіодудифракційноїґраткидо

кривизнихвильовогофронтупринезміннійплощинісамовідтворення

зображенняЗапропонованотареалізованодвоканальнусхемусенсора

хвильовогофронтувякійсенсорШекаХартманавикористовуєтьсядля

попередньоїгрубоїоцінкиаточнівимірюванняабераційпроводяться

адаптивнимсенсоромТалботазкерованимелектрооптичнимекраном