



УКРАЇНА

(19) UA (11) 37662 (13) U  
(51) МПК (2006)  
G01B 9/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ НАХИЛІВ ХВИЛЬОВОГО ФРОНТУ В СЕНСОРІ ШЕКА-ГАРТМАНА З ГОЛОГРАФІЧНОЮ ПАМ'ЯТТЮ

1

2

(21) u200806349

(22) 13.05.2008

(24) 10.12.2008

(46) 10.12.2008, Бюл.№ 23, 2008 р.

(72) ПОДАНЧУК ДМИТРО ВАСИЛЬОВИЧ, UA, ДАНЬКО ВОЛОДИМИР ПЕТРОВИЧ, UA, КОТОВ МИХАЙЛО МИКОЛАЙОВИЧ, UA, СУТЯГІНА НАТАЛІЯ СЕРГІЙВНА, UA

(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА, UA

(57) 1. Спосіб визначення локальних нахилів хвильового фронту в сенсорі Шека-Гартмана з голографічною пам'яттю, що включає реєстрацію на фоточутливому матеріалі голографічної матриці мікролінз за допомогою опорного пучка, який формують шляхом оптичного перенесення в площину фоточутливого матеріалу еталонного раstra мікролінз, та об'єктного пучка з початковим станом аберацій, який утворюють шляхом взаємодії монохроматичного когерентного пучка з об'єктом, спрямування на голографічну матрицю мікролінз об'єктного пучка із зміненим станом аберацій, вимірювання на фотодетекторі зміщення кожної сфокусованої голограмою світлової точки від оптичної осі відповідної голографічної мікролінзи та визначення локальних нахилів хвильового фронту, який відрізняється тим, що фіксують максимально можливу величину зміщення хоча б для одної із сфокусованих голограмою світлових точок, здійснюють перереєстрацію на фоточутливому матеріалі голографічної матриці мікролінз за допомогою опорного пучка та об'єктного пучка з поточним станом аберацій, після чого спрямовують на голографічну матрицю мікролінз об'єктний пучок із змі-

неним станом аберацій, вимірюють на фотодетекторі зміщення кожної сфокусованої голограмою світлової точки від оптичної осі відповідної голографічної мікролінзи та локальні нахили хвильового фронту по ортогональних осях X і Y визначають для кожної мікролінзи після n перереєстрацій голографічної матриці мікролінз за формулами

$$\theta_x = \arctg\left(\frac{\Delta x}{f}\right) + \sum_{m=1}^n \arctg\left(\frac{\Delta x_m}{f}\right);$$

$$\theta_y = \arctg\left(\frac{\Delta y}{f}\right) + \sum_{m=1}^n \arctg\left(\frac{\Delta y_m}{f}\right),$$

де  $\theta_x, \theta_y$  - локальний нахил хвильового фронту відповідно по осях X та Y;

$\Delta x, \Delta y$  - зміщення точки, сфокусованої відповідною мікролінзою голографічної матриці;

$\Delta x_m, \Delta y_m$  - максимальне досягнуте зміщення точки, сфокусованої відповідною мікролінзою голографічної матриці, для m-го кроку;

f - фокусна відстань голографічної матриці мікролінз.

2. Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що використовують об'єктний пучок, який утворюють шляхом проходження монохроматичного когерентного пучка через об'єкт.

3. Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що використовують об'єктний пучок, який утворюють шляхом відбиття монохроматичного когерентного пучка від об'єкта.

Корисна модель належить до вимірювальної техніки, адаптивної оптики та голографії і може бути використана для визначення локальних нахилів хвильового фронту в залежності від динаміки його змін у часі, наприклад, з метою тестування деформацій шорсткої поверхні у реальному масштабі часу.

Відомий спосіб визначення локальних нахилів хвильового фронту в сенсорі Шека-Гартмана [G.Rousset. Wavefront sensing // Adaptive Optics for Astronomy / Ed. D. M. Alloin and J.-M. Mariotti. - NATO ASI Series: Kluwer Academic Publ., 1994. - p.116-137] передбачає спрямування досліджуваного хвильового фронту на рефракційну матрицю мікролінз, вимірювання на фотодетекторі зміщен-

(13) U

(11) 37662

(19) UA

ня кожної сфокусованої світлової точки від оптичної осі відповідної рефракційної мікролінзи та визначення локальних нахилів хвильового фронту. До недоліків цього способу слід віднести неможливість визначення локальних нахилів сильно викривленого хвильового фронту, оскільки зміщення фокальних точок в площині фотодетектора будуть занадто великими, через що процедура співставлення цих точок із відповідними субапертурами мікролінз суттєво ускладниться або взагалі стане неможливою.

Відомий спосіб визначення локальних нахилів хвильового фронту [Патент США № 5233174, МПК G01J 1/20, опубл. 3.08.1993] передбачає використання для цього матриці дифракційних фокусуєчих елементів з оптичним центром, який зміщений відносно геометричного центру кожної мікролінзи таким чином, щоб внести рівний по величині але протилежний по знаку нахил в падаючий хвильовий фронт з наперед відомою аберацією. Недоліком способу є обмежені можливості його застосування, що проявляється у складності його реалізації - для кожної конкретної задачі необхідно попередньо визначити можливі аберації досліджуваної хвилі, щоб на основі цих вимірювань "запрограмувати" матрицю-коректор.

Найближчим до заявленого є спосіб визначення локальних нахилів хвильового фронту в сенсорі Шека-Гартмана з голографічною пам'яттю [J.Y.Son, D.V.Podanchuk, V.P.Danko, K.D.Kwak. Shack-Hartmann wavefront sensor with holographic memory // Optical engineering, 2003, v.42, №11, P. 3389-3398]. Даний спосіб передбачає реєстрацію на фоточутливому матеріалі голографічної матриці мікролінз за допомогою опорного пучка, який формують шляхом оптичного перенесення в площину фоточутливого матеріалу еталонного растру мікролінз, та об'єктного пучка з початковим станом аберацій, який утворюють шляхом взаємодії монохроматичного когерентного пучка з об'єктом, спрямування на голографічну матрицю мікролінз об'єктного пучка із зміненим станом аберацій, вимірювання на фотодетекторі зміщення кожної сфокусованої голограмою світлової точки від оптичної осі відповідної голографічної мікролінзи та визначення локальних нахилів хвильового фронту.

Цей спосіб обраний нами за спосіб-прототип. Його основний недолік - обмежені можливості його застосування, а саме: малий діапазон визначення локальних нахилів досліджуваного хвильового фронту, який визначається параметрами еталонного растру мікролінз та величиною спотворень хвильового фронту.

В основу корисної моделі поставлена задача розширення функціональних можливостей способу - збільшення діапазону визначення локальних нахилів хвильового фронту відповідно до динаміки його змін у часі та визначення локальних нахилів спотвореного спеклами хвильового фронту шляхом перереєстрації голографічної матриці мікролінз.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі визначення локальних нахилів хвильового фронту в сенсорі Шека-Гартмана з голографічною пам'яттю, що включає реєстрацію на фото чутли-

вому матеріалі голографічної матриці мікролінз за допомогою опорного пучка, який формують шляхом оптичного перенесення в площину фоточутливого матеріалу еталонного растру мікролінз, та об'єктного пучка з початковим станом аберацій, який утворюють шляхом взаємодії монохроматичного когерентного пучка з об'єктом, спрямування на голографічну матрицю мікролінз об'єктного пучка із зміненим станом аберацій, вимірювання на фото детекторі зміщення кожної сфокусованої голограмою світлової точки від оптичної осі відповідної голографічної мікролінзи та визначення локальних нахилів хвильового фронту, згідно з винаходом, що заявляється, фіксують максимально можливу величину зміщення хоча б для одної із сфокусованих голограмою світлових точок, здійснюють перереєстрацію на фоточутливому матеріалі голографічної матриці мікролінз за допомогою опорного пучка та об'єктного пучка з поточним станом аберацій, після чого спрямовують на голографічну матрицю мікролінз об'єктний пучок із зміненим станом аберацій, вимірюють на фотодетекторі зміщення кожної сфокусованої голограмою світлової точки від оптичної осі відповідної голографічної мікролінзи та локальні нахили хвильового фронту по ортогональних осях X і Y визначають для кожної мікролінзи після n перереєстрацій голографічної матриці мікролінз за формулами

$$\theta_x = \arctg\left(\frac{\Delta x}{f}\right) + \sum_{m=1}^n \arctg\left(\frac{\Delta x_m}{f}\right);$$

$$\theta_y = \arctg\left(\frac{\Delta y}{f}\right) + \sum_{m=1}^n \arctg\left(\frac{\Delta y_m}{f}\right),$$

де  $\theta_x, \theta_y$  - локальний нахил хвильового фронту відповідно по осях X та Y;

$\Delta x, \Delta y$  - зміщення точки, сфокусованої відповідною мікролінзою голографічної матриці;

$\Delta x_m, \Delta y_m$  - максимальне досягнуте зміщення точки, сфокусованої відповідною мікролінзою голографічної матриці, для m-то кроку;

f - фокусна відстань голографічної матриці мікролінз.

Крім того, поставлена задача вирішується також тим, що в способі визначення локальних нахилів хвильового фронту в сенсорі Шека-Гартмана з голографічною пам'яттю об'єктний пучок утворюють шляхом проходження монохроматичного когерентного пучка через об'єкт або шляхом відбиття від нього.

Сукупність нових ознак, а саме послідовна перереєстрація матриці голографічних мікролінз та сумування визначених кожною голограмою локальних нахилів хвильового фронту дозволяє адаптувати процес вимірювання до динаміки змін хвильового фронту у часі та збільшити діапазон визначення його локальних нахилів. Крім того, за допомогою заявленого способу є можливість визначати локальні нахили спотвореного спеклами хвильового фронту, що було неможливо раніше. Це здійснюється кожною голографічною матрицею мікролінз шляхом компенсації спотворень для по-

слідовних станів зашумленого спеклами хвильового фронту.

Суть корисної моделі пояснюється наступними кресленнями та таблицями:

Фіг. 1. Оптична схема сенсора для визначення локальних нахилів хвильового фронту, що утворюють шляхом проходження пучка через об'єкт.

Фіг. 2. Оптична схема сенсора для визначення локальних нахилів хвильового фронту, що утворюють шляхом відбиття пучка від об'єкту.

Табл. 1. Результати визначення локальних нахилів хвильового фронту, що утворюють шляхом проходження пучка через об'єкт.

Табл. 2. Результати визначення локальних нахилів хвильового фронту, що утворюють шляхом відбиття пучка від дифузного об'єкту.

Розглянемо детально реалізацію запропонованого способу визначення локальних нахилів хвильового фронту в сенсорі Шека-Гартмана з голографічною пам'яттю.

Фіг. 1 пояснює хід променів в сенсорі з об'єктом хвильовим фронтом, утвореним шляхом пропускання пучка через досліджуваний об'єкт 10. На шляху плоского монохроматичного когерентного пучка розміщено напівпрозоре дзеркало 1. По ходу пучка, що пройшов крізь дзеркало 1, розташовані: дзеркало 2, еталонна рефракційна матриця мікролінз 3 із субапертурами  $0.4 \times 0.4$  мм та однаковою фокусною відстанню 24 мм, лінзи 4 і 5, напівпрозоре дзеркало 6 та фоточутливий матеріал 7 (голографічні платівки ПФГ-01), причому рефракційна матриця мікролінз 3 знаходиться у передній фокальній площині лінзи 4, задня фокальна площина лінзи 4 співпадає з передньою фокальною площиною лінзи 5, фоточутливий матеріал розміщено у задній фокальній площині лінзи 5 перпендикулярно її оптичній осі. Досліджуваний об'єкт 10 складається із лінз 8 і 9, причому лінза 8 може рухатися вздовж спільної оптичної осі (на початку вимірювань задня фокальна площина лінзи 8 співпадає з передньою фокальною площиною лінзи 9). Його розміщують по ходу відбитого від напівпрозорого дзеркала 1 пучка. За ним розташовані: лінза 11, дзеркало 12, лінза 13, напівпрозоре дзеркало 6 та фоточутливий матеріал 7, причому лінза 9 знаходиться у передній фокальній площині лінзи 11, задня фокальна площина лінзи 11 співпадає з передньою фокальною площиною лінзи 13, задній фокус лінзи 13 співпадає з заднім фокусом лінзи 5, а їх оптичні осі утворюють кут  $-10^\circ$ . Фотодетектор 14 (телевізійна матриця приладів з зарядовим зв'язком - ПЗЗ) знаходиться у фокальній площині голографічної матриці мікролінз, яка реєструється на фоточутливому матеріалі 7.

Фіг. 2 пояснює хід променів в сенсорі з об'єктом хвильовим фронтом, утвореним шляхом відбиття пучка від досліджуваного об'єкту 17, який розміщений в передній фокальній площині лінзи 11. По ходу відбитого від дзеркала 1 пучка знаходиться: дзеркало 15 та напівпрозоре дзеркало 16. Розташування елементів 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 14, 15 аналогічно тому, що наведено на Фіг. 1.

Процес визначення локальних нахилів об'єктового хвильового фронту із використанням заявленого способу відбувається наступним чином. Пло-

ський монохроматичний пучок, що відбивається від напівпрозорого дзеркала 1, формує об'єктний хвильовий фронт шляхом проходження пучка через досліджуваний об'єкт 10 (Фіг. 1), або відбиттям від досліджуваного об'єкту 17, на який він спрямовується за допомогою дзеркал 15, 16 (Фіг. 2). Пучок, що пройшов крізь дзеркало 1, спрямовується за допомогою дзеркала 2 на рефракційну матрицю мікролінз 3 та формує опорну хвилю, яка представляє собою систему сфокусованих пучків від кожної мікролінзи у межах їх субапертур. Її за допомогою системи лінз 4 та 5 переносять у площину голографічної платівки 7. Вихідні площини об'єктів 10 та 17 за допомогою системи лінз 11, 13 та дзеркал 12, 6 переносять у площину голографічної платівки, на якій реєструється голографічна матриця мікролінз 7. Після чого на голографічну матрицю мікролінз спрямовують об'єктний пучок і у першому порядку дифракції, який співпадає з напрямком розповсюдження опорної хвилі, на відстані рівній фокусній відстані голографічної матриці мікролінз отримують систему сфокусованих голограмою точок, так звану гартманогаму. Зміщення точок гартманограми відносно відповідних оптичних осей голографічних мікролінз є пропорційним до усередненого по кожній субапертурі локального нахилу хвильового фронту. Положення центру точки, як правило, визначається як положення центру ваги:

$$x = \frac{\sum_{i,j} x_{ij} I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}}; \Delta y = \frac{\sum_{i,j} y_{ij} I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}}; \quad (1)$$

де  $I_{ij}$  - значення інтенсивності у відповідному пікселі,  $(x_{ij}, y_{ij})$  - його координати; сумування ведеться за всіма пікселями субапертури, що відносяться до даної мікролінзи.

Приклад 1. Визначення локальних нахилів хвильового фронту, що утворюють шляхом проходження пучка через досліджуваний об'єкт.

Тестовий експеримент проводили наступним чином: перша голографічна матриця мікролінз ГММ<sub>1</sub> реєструвалася за допомогою опорної хвилі від рефракційної матриці 3 та плоского об'єктного пучка, що утворювався об'єктом 10 при конфокальному положенні лінз 8 та 9. Далі на неї спрямовували сферичний об'єктний пучок, кривизна якого змінювалася шляхом зміщення лінзи 8 вздовж її оптичної вісі. При досягненні максимально можливих зміщень сфокусованих точок для першої голографічної матриці мікролінз послідовно записували на тому ж місці другу, в якій реєстрували поточний стан аберацій об'єктного пучка. Подальші вимірювання проводили вже за допомогою другої голографічної матриці мікролінз ГММ<sub>2</sub> до тих пір, поки не були досягнуті межі її вимірювального діапазону. Потім реєстрували третю голографічну матрицю мікролінз ГММ<sub>3</sub> і за її допомогою продовжували вимірювання. За експериментальними виміряними зміщеннями визначали локальні нахили досліджуваного хвильового фронту згідно із заявленим способом. У таблиці 1 наведено результати визначення локальних нахилів сферичного хвильового фронту, виміряних на межі дослі-

джуваної апертури при різній величині зміщення  $d$  лінзи 8 в об'єкті 10. Як видно, із використанням трьох кроків ітерації ( $n = 3$ ), тобто трьох послідовно записаних голографічних матриць мікролінз, вдалося визначити локальні нахили досліджуваного хвильового фронту у діапазоні до 18.9 мілірадіан. Слід зауважити, що виміряти такі значення локальних нахилів хвильового фронту за допомо-

гою рефракційної матриці мікролінз з вказаними вище параметрами неможливо. Її граничні значення досягають величини  $\sim 6$  мілірадіан. Таким чином, діапазон вимірювання локальних нахилів хвильового фронту при використанні заявленого способу на прикладі трьох кроків ітерації приблизно в 3.2 рази перевищував діапазон вимірювань аналогічними способами.

Таблица 1

| №    | $d$ , мм | $\theta_{\text{ап}}$ , мрад |
|------|----------|-----------------------------|
| ГММ1 | 0.00     | 0.0                         |
|      | 0.55     | 0.3                         |
|      | 1.05     | 0.6                         |
|      | 2.05     | 1.3                         |
|      | 3.05     | 2.0                         |
|      | 4.05     | 2.9                         |
|      | 5.05     | 3.9                         |
|      | 6.05     | 5.2                         |
|      | 6.55     | 5.9                         |
| ГММ2 | 6.55     | 5.9                         |
|      | 6.8      | 6.3                         |
|      | 7.05     | 6.7                         |
|      | 7.55     | 7.5                         |
|      | 8.55     | 9.4                         |
|      | 9.05     | 10.6                        |
| ГММ3 | 9.55     | 11.9                        |
|      | 9.7      | 12.4                        |
|      | 9.8      | 12.7                        |
|      | 10.05    | 13.6                        |
|      | 10.3     | 14.4                        |
|      | 10.8     | 16.4                        |
|      | 11.3     | 18.9                        |

Приклад 2. Визначення локальних нахилів хвильового фронту, що утворюють шляхом відбиття пучка від досліджуваного об'єкту.

Об'єкт 17 являв собою металевий диск діаметром 20мм, затиснутий по периметру. За час вимірювань диск деформувався за допомогою мікрометричного гвинта, що здійснював контрольований тиск у центрі. Оскільки поверхня диска є шорсткою, то падаючий пучок при відбиванні від нього розсіювався, що призводило до виникнення спек-

лів [Г. Колфилд. Спеклы // Оптическая голография, т.2 / под ред. Г.Колфилда. - М.: Мир, 1982 - с.401-406]. Спекли сприяють виникненню шуму на гартманограмах, що значно ускладнює або унеможливує процес вимірювання локальних нахилів хвильового фронту в сенсорах Шека-Гартмана з матрицею рефракційних мікролінз [Ларичев А.В., Иванов П.В., Ирошников Н.Г., Шмальгаузен В.И. Определение аберраций глаза в присутствии спекл-поля // Квантовая Электроника- 2001- т.31. -

№12- С. 1108-1112.]. Проте, якщо спотворений спеклами відбитий пучок використовувати як об'єктний при виготовленні голографічної матриці мікролінз за заявленим способом, то при відновленні голограми у фокальній площині матриці буде формуватись незашумлена гартманограма із добре сфокусованими точками. При деформації об'єкту ці точки будуть зміщуватись так само, як і при дослідженні без спекл-поля - пропорційно локальним нахилам поверхні, що дає змогу визначити відхилення форми поверхні від початкової. Подальші деформації зразка дещо змінюють структуру

спекл-поля, що знов призводить до зашумлення гартманограм. Проте, вчасно перереєстручи голографічну матрицю мікролінз 7 можна у досить широкому діапазоні змін локальних нахилів відслідковувати динаміку зашумленого спеклами хвильового фронту. Це суттєво відрізняє спосіб, що пропонується, від відомих аналогів. У таблиці 2 наведені значення локальних нахилів хвильового фронту, відбитого від дифузної поверхні об'єкту 17, виміряні на межі досліджуваної апертури, при різній величині прогину диска  $\Delta z$ .

Таблиця 2

| №    | $\Delta z$ , мкм | $\theta_{\text{ап}}$ , мрад |
|------|------------------|-----------------------------|
| ГММ1 | 10               | 0.2                         |
|      | 20               | 0.6                         |
|      | 30               | 0.9                         |
| ГММ2 | 30               | 0.9                         |
|      | 40               | 1.2                         |
|      | 50               | 1.5                         |
| ГММ3 | 50               | 1.5                         |
|      | 60               | 1.8                         |
|      | 70               | 2.2                         |
|      | 80               | 2.5                         |

Всього під час вимірювань послідовно було зареєстровано три матриці мікролінз при різних деформаціях диска: при нульовому напруженні (ГММ<sub>1</sub>) та при прогині у центрі 30мкм (ГММ<sub>2</sub>) і 50мкм (ГММ<sub>3</sub>). При цьому, прогину в 30мкм відповідав локальний нахил у 0.9 мілірадіан на межі апертури, а прогину в 50мкм, відповідно, 1.5 мілірадіана. Отримані експериментальні результати показали, на відміну від відомих способів, можливість визначення заявленим способом локальних нахилів спотворених спеклами хвильових фронтів.

Таким чином, спосіб визначення локальних нахилів хвильового фронту в сенсорі Шека-Гартмана з голографічною пам'яттю, що пропонується, дозволив в порівнянні із відовими способами збільшити приблизно у 3 рази діапазон визначення локальних нахилів хвильового фронту. Крім того, з'явилась можливість адаптувати процес вимірювання до динаміки змін спотвореного спеклами хвильового фронту у часі, що дало змогу досліджувати хвильові фронти у шумах.



