

УДК 53.082.5

Поданчук Д. В.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с.  
Котов М. М., пров. інж.  
Петрів Д. А., студент

### Апертурні обмеження сенсора хвильового фронту на ефекті Талбота

*Експериментально досліджено вплив розміру апертури на точність відновлення хвильового фронту сенсором на основі ефекту Талбота. На прикладі набору сферичних та астигматичних лінз показано, що вплив апертурних ефектів більш відчутний при збільшенні величини аберацій досліджуваного хвильового фронту.*

*Ключові слова:* ефект Талбота, сенсор хвильового фронту Шека-Хартмана, поліноми Церніке

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03022, м. Київ, просп. Глушкова, 4-г. e-mail: pdv@univ.kiev.ua

Podanchuk D. V., Ph. D., senior researcher  
Kotov M. M., advanced engineer  
Petriv D. A., student

### Aperture limitations of the wavefront sensor based on the Talbot effect

*The influence of aperture size on the accuracy of wavefront reconstruction with the sensor based on the Talbot effect is experimentally investigated. The analysis of set of spherical and astigmatic lenses shows that the aperture effects grow with the magnitude of the wavefront aberrations.*

*Key Words:* wavefront sensing, Talbot effect, Shack-Hartmann wavefront sensor, Zernike polynomials.

Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03022, Kyiv, Glushkova ave., 4g. e-mail: pdv@univ.kiev.ua

Статтю представив д. ф.-м. н., проф. Данілов.В. В.

#### Вступ

У теперішній час достатньо актуальною стала проблема безконтактного визначення характеристик просторово неоднорідних об'єктів. Серед методів оптичної діагностики особливе місце належить проведенню вимірів та аналізу хвильового фронту, що пройшов досліджуваній об'єкт, або відбитого від його поверхні. З цією метою широко використовується сенсор хвильового фронту Шека-Хартмана [1, 2]. Принцип його дії полягає у наступному. Лінзовий растр фокусує на CCD-камеру лазерний пучок, що відбивається чи проходить через досліджуваній об'єкт. При цьому зсув кожної фокальної плями пропорційний локальному нахилу хвильового фронту. Матриця локальних нахилів перетворюється в набір коефіцієнтів при поліномах Церніке, що повністю описують аберації хвильового фронту та дозволяють кількісно відновити форму досліджуваного об'єкта. Значною перешкодою у застосуванні сенсорів для прецизійного моніторингу об'єктів є неузгодженість між чутливістю, просторовим розрізненням та кутовим динамічним діапазоном. Просторове розрізнення сенсора Шека-Хартмана визначається розміром мікролінз у растрі. Їх

зменшення фактично призводить до зменшення фокальної відстані, а отже, до погіршення кутової чутливості сенсора.

Одним з можливих рішень цієї проблеми є використання для створення сенсорів хвильового фронту ефекту Талбота. Він полягає у тому, що зображення періодичного об'єкта, освітленого монохроматичною хвилею, без допомоги будь-якої оптичної системи самовідтворюється на деякій відстані, яка називається відстанню Талбота. Якщо падаюча хвиля має аберації, то зображення об'єкту спотворюється. За відмінністю викривленого зображення об'єкта від початкового можна відновити форму падаючої хвилі. Якщо у якості періодичного об'єкту взяти двовимірну періодичну структуру, то за методом вимірювання та обробки даних такий сенсор буде подібний до сенсору Шека-Хартмана. При цьому сенсор заснований на ефекті Талбота має кращу просторову роздільну здатність та є більш простим у реалізації [3, 4]. Це пов'язано з тим, що у якості вхідного елементу можна використовувати бінарні ґратки із значно меншим періодом, ніж розмір мікролінзи в матриці, і вони значно простіші у виготовленні. Однак повне самовідтворення зображення відбуватиметься лише у випадку

нескінченної періодичної ґратки [5]. На практиці апертура ґратки, як правило, обмежується декількома періодами, що необхідно враховувати у реальному експерименті.

Метою даної роботи було дослідити вплив апертури двовимірної періодичної структури на якість відновлення хвильового фронту сенсором на основі ефекту Талбота (сенсором Талбота).

### Експериментальні дослідження

Оцінка можливостей сенсора Талбота проводилася на експериментальній установці, оптична схема якої представлена на рис.1. У якості когерентного джерела світла використовується He-Ne лазер ( $\lambda=0,63\text{мкм}$ ). Колімований лазерний пучок потрапляє на досліджувану лінзу  $L$ . Хвильовий фронт після лінзи за допомогою напівпрозорого дзеркала НПД розділяється по двом каналам. Частина, що пройшла, потрапляє в площину двовимірної дифракційної ґратки ДГ. Безпосередньо перед ґраткою вводиться квадратна діафрагма  $D$ , яка відкриває для освітлення частину ґратки з необхідним числом періодів. На відстані Талбота ( $Z_T$ ) від неї знаходиться фотоприймач ПЗЗ<sub>1</sub>, на який реєструється відновлене зображення ґратки. Відбитий від дзеркала НПД хвильовий фронт аналізується сенсором Шека-Хартмана, матриця рефракційних мікролінз (ММЛ) якого розташована на тій самій відстані від лінзи  $L$ , що й дифракційна ґратка ДГ. Діаметр мікролінз матриці складає 0,4 мм, фокусна відстань 24 мм. У фокальній площині матриці знаходиться фотоприймач ПЗЗ<sub>2</sub>. Таким чином, ми мали можливість порівнювати результати вимірювання досліджуваного хвильового фронту сенсором Талбота з результатами, які були отримані за допомогою сенсора Шека-Хартмана.

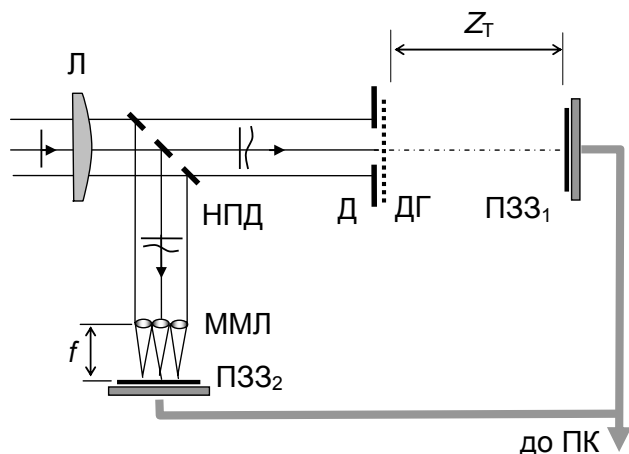


Рис.1. Оптична схема установки по тестуванню сенсора на основі ефекту Талбота.

В експериментах використовувалася двовимірною амплітудною бінарною ґраткою з квадратними отворами розміром 80 мкм та періодом ( $d$ ) рівним 160 мкм. Ґратка була виготовлена на основі фото-платівки ПФГ-01 шляхом проектування зменшеного зображення необхідної структури. Розмір ґратки становив  $8 \times 8$  мм, що відповідає 49 періодам. Реєстрування розподілу інтенсивності у зображенні ґратки проводилося в площині Талбота ( $Z_T = 2d^2/\lambda \approx 80$  мм). У якості досліджуваних лінз використовувалися сферичні та астигматичні лінзи.

Експеримент проводився наступним чином. Сферичні хвильові фронти створювалися за допомогою лінз з оптичною силою ( $D$ ) від  $-5,0$  дптр до  $+1,0$  дптр., які розташовувалися на відстані  $\sim 0,4$  м перед площинами вимірювань. На рис.2 представлені результати вимірювань кривизни сферичного хвильового фронту ( $1/R$ ) сенсором Талбота з апертурою ґратки  $17 \times 17$  періодів та сенсором Шека-Хартмана. Як видно, діапазон зміни кривизни досліджуваного хвильового фронту у вимірювальній площині становить від  $-2,1 \text{ м}^{-1}$  дптр до  $1,3 \text{ м}^{-1}$ . Значення кривизни, що отримані за допомогою різних сенсорів, практично однакові. Відмінність в середньому склала  $\sim 0,8\%$  ( $1/R$ ) при стандартному відхиленні меншому, ніж  $0,1\%$  ( $1/R$ ).

У подальшому аналізувалися хвильові фронти сенсором Талбота з різними апертурами ґратки. Розмір апертури зменшувався від повної ( $49 \times 49$ ) до  $9 \times 9$  періодів шляхом введення у пучок відповідної діафрагми. Відновлення хвильового фронту відбувалось за масивом  $7 \times 7$  точок із зображення ґратки. На рис.3 представлені середні значення відхилень (по п'яти реалізаціям) коефіцієнтів дефокусування (у довжинах хвилі) досліджуваного хвильового фронту, які були отримані за допомогою сенсора Талбота з різною

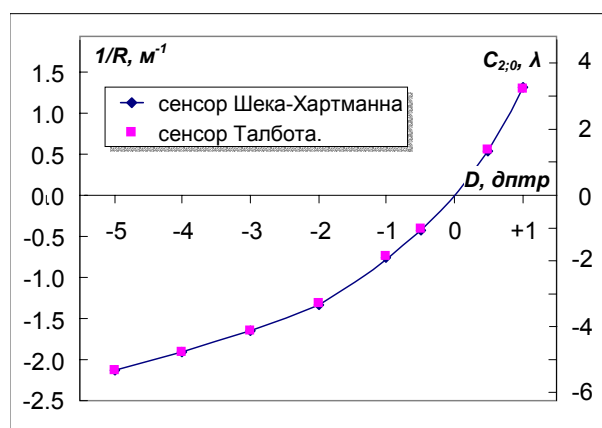


Рис.2. Значення кривизни та коефіцієнтів дефокусування тестових сферичних хвильових фронтів.

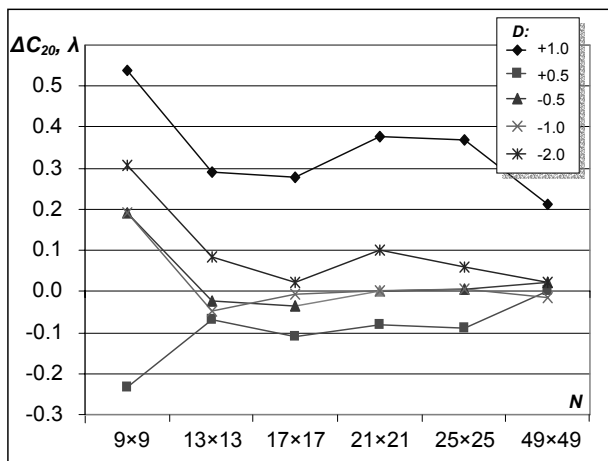


Рис.3. Відхилення значень кривизни хвильового фронту від еталонних при різних розмірах апертури дифракційної ґратки в сенсорі Талбота.

апертурою ґратки, відносно значень, що вимірювалися сенсором Шека-Хартмана. Слід зауважити, що похибка вимірювання, яка пов'язана з неточністю встановлення діафрагми, не перевищувала 1% від середнього значення. З рисунку видно, що при повній апертурі ґратки експериментальні дані для лінз з оптичною силою +0,5 дптр, -0,5 дптр, -1,0 дптр, -2,0 дптр однакові і практично співпадають з еталонними значеннями, які були отримані за допомогою сенсора Шека-Хартмана. Виключення становлять дані для лінзи з оптичною силою +1,0 дптр. На рис. 4а,б представлені фрагменти зображень ґратки у площині Талбота при освітленні повної апертури для лінз з оптичною силою відповідно +1,0 дптр та +0,5 дптр. Як видно, зображення для лінзи з  $D=+1,0$  дптр більш розмите, що пов'язано, на наш погляд, з більшою сферичністю досліджуваної хвилі. Таким чином, вимірювальний діапазон сенсора Талбота для збіжної сферичної хвилі при зменшенні області

відновлення хвильового фронту звужується. Це призводить до збільшення відхилень експериментальних точок на рис.3 для лінзи з  $D = +1,0$  дптр у порівнянні з іншими. Для лінз з оптичною силою від +0,5 дптр до -2,0 дптр відхилення не перевищують значень  $0,1\lambda$  для апертур від 25 до 13 рядків ґратки.

Відхилення вимірюваних значень кривизни від еталонних для всіх лінз різко збільшується при  $N = 9$ , що обумовлено впливом апертурних ефектів. На рис.4в представлено зображення ґратки, обмеженої апертурою  $9 \times 9$ , для лінзи з оптичною силою 0,5 дптр. Як видно, при зменшенні апертури освітлення практично до розмірів, в яких проводиться відновлення ( $7 \times 7$ ), зображення ґратки різко погіршується. Точки зображення змінюють свою форму, що призводить до похибки в вимірюванні їх центрів ваги, і, як наслідок, до неправильного визначення абераций досліджуваного хвильового фронту.

В наступній серії експериментів досліджувався вплив апертурних ефектів на вимірювання сенсором Талбота астигматичного хвильового фронту. Використовувалися дві астигматичні лінзи: перша мала сферу +0,75 дптр та циліндр -0,25 дптр; друга – сферу +2,5 дптр та циліндр -0,5 дптр. Вони були розташовані на відстані  $\sim 0,25$  м перед площинами вимірювань. З метою компенсації надмірної сферичності другої лінзи перед нею була додатково розміщена тонка розсіювальна лінза з оптичною силою -3,0 дптр. У якості еталонних величин приймалися значення коефіцієнтів Церніке для абераций дефокусування ( $C_{2,0}$ ) та астигматизму ( $C_{2,2}$  та  $C_{2,-2}$ ), які були виміряні за допомогою сенсора Шека-Хартмана. Відновлення хвильового фронту в сенсорі Талбота здійснювалося на апертурі розмірністю  $7 \times 7$  періодів. Апертура ґратки, що опромінювалася досліджуваним хвильовим фронтом, змінювалася

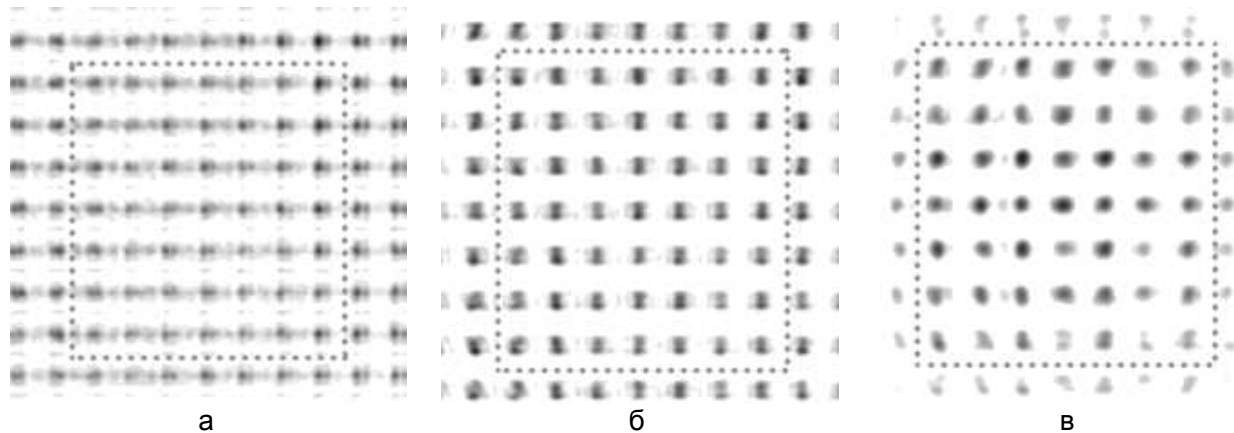
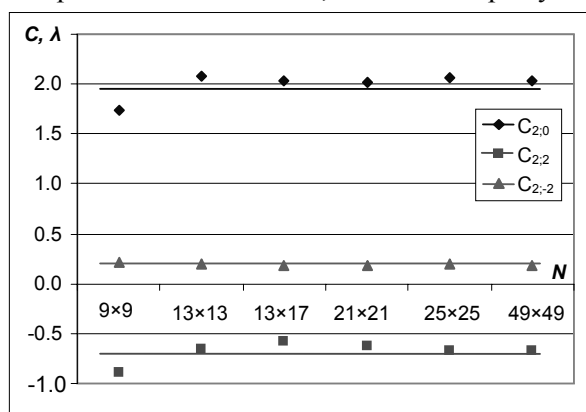


Рис.4. Зображення ґратки в площині Талбота: за лінзою +1 дптр при повному освітленні (а); за лінзою +0,5 дптр при повному освітленні (б) та при освітленні апертури  $9 \times 9$  періодів (в)..

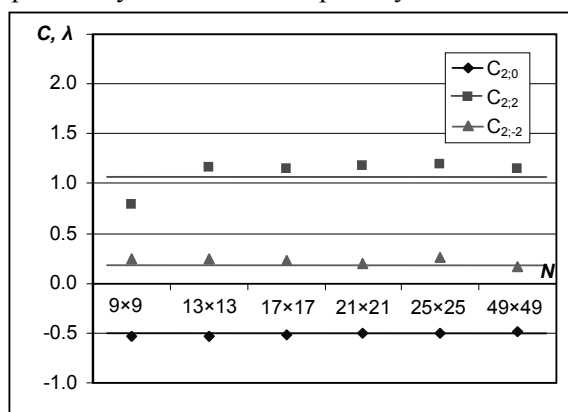
від  $49 \times 49$  періодів до  $9 \times 9$  періодів. При цьому положення обмежувальної діафрагми контролювалося за допомогою спеціальної оптичної схеми.

На рис.5 представлені величини коефіцієнтів Церніке (у довжинах хвилі), які були виміряні сенсором Талбота на апертурі  $7 \times 7$  періодів для двох астигматичних лінз. На графіку прямими лініями показані значення коефіцієнтів, що були отримані за допомогою сенсора Шека-Хартмана. Слід зауважити, що всі величини приведені до апертури одиничного радіусу. Виходячи з експериментальних даних, можна стверджувати,

що для аберацій дефокусування та астигматизму ( $C_{2,-2}$  на рис.5а та  $C_{2,0}$ ,  $C_{2,-2}$  на рис.5б), величина яких по модулю не перевищує  $0,5 \lambda$ , визначені величини відповідних коефіцієнтів Церніке однакові в межах похибки для всіх апертур ґратки в сенсорі Талбота. Для більших аберацій ( $C_{2,0}$ ,  $C_{2,2}$  на рис.5а та  $C_{2,2}$  на рис.5б) при зменшенні апертури освітлення до  $9 \times 9$  періодів спостерігається різке відхилення (до  $0,5 \lambda$ ) даних від еталонних величин, що отримані сенсором Шека-Хартмана. Це також пов'язане з впливом апертурних ефектів на процес відтворення розподілу інтенсивності ґратки у площині Талбота.



а



б

Рис.5 Значення коефіцієнтів Церніке (дефокусування та астигматизм), що були отримані за допомогою сенсора Талбота при різних апертурах ґратки (N), для двох тестових хвильових фронтів.

### Висновки

Експериментально проаналізовано вплив апертурних ефектів на якість відновлення хвильового фронту сенсором на ефекті Талбота. Показано, що при умові освітлення повної апертури ґратки розмірністю  $49 \times 49$  періодів визначення аберацій при обробці її зображення меншої розмірності дає надійні результати, які

співпадають з даними від сенсора Шека-Хартмана. При зменшенні апертури ґратки практично до розмірів, в яких проводиться відновлення, зображення ґратки різко погіршується, що приводить до похибки у визначенні аберацій. Показано, що вплив апертурних ефектів більш відчутний при збільшенні величини аберацій досліджуваного хвильового фронту.

### Список використаних джерел

1. Podanchuk D., Dan'ko V., Kisil A., Kovalenko A., Kotov M. Wave-front sensor for metrological applications // Bulletin of the University of Kiev. Series: Physics & Mathematics.– 2001. – No3.– P. 392–399. (in Ukrainian).
2. Goloborodko A., Grygoruk V., Kurashov V., Podanchuk D., and Sutyagina N. Determination of local surface defects using a Shack-Hartmann wavefront sensor // Ukr. J. Phys.– 2008.– **53**.– P. 946 – 951.
3. Podanchuk D., Kurashov V., Dan'ko V., Kotov M., Parkhomenko O. Wavefront sensor based on the Talbot effect // Bulletin of the University of Kiev. Series: Radiophysics and electronics.– 2011.– №16.– P.43–46.
4. Podanchuk D., Kurashov V., Goloborodko A., Dan'ko V., Kotov M., Goloborodko N. Wavefront sensor based on the Talbot effect with the precorrected holographic grating/ // Applied Optics.– 2012. – **51** – P.C125–C132.
5. Goloborodko A. Effect of periodic structures aperture on Talbot phenomena // Bulletin of the University of Kiev. Series: Physics & Mathematics.– 2012. – No3.– P. 243–244. (in Ukrainian).

Надійшла до редколегії 03.04.2013