

УДК 535.3:681:7

Данько В.П.¹, пров. інж.
Поданчук Д.В.¹, к.ф.-м.н., с.н.с.,
Піденко С.С.¹, студент

Визначення аберацій короткофокусних лінз сенсором Шека-Хартмана

Експериментально досліджено метод вимірювання аберацій короткофокусних лінз, який ґрунтується на використанні точкового джерела світла та сенсора Шека-Хартмана з масштабуючою оптичною системою. Проведена оцінка достовірності отриманих результатів та виміряні сферичні аберації короткофокусних лінз.

Ключові слова: сенсор Шека-Хартмана, аберації, короткофокусна лінза.

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, радіофізичний факультет, 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 64/13
e-mail: wlad@univ.kiev.ua.

V. P. Dan'ko¹, adv. engineer,
D. V. Podanchuk¹, Ph.D., senior staff scientist
S. S. Pidenko¹, student

The measurement of short-focus lens aberrations by Shack-Hartman sensor

The method of measuring aberrations of short-focus lenses, which is based on the use of a point light source and Shack-Hartman sensor with scaling optical system, was experimentally investigated. The evaluation of the reliability of the obtained results was performed and the short-focus lens spherical aberrations were measured.

Key Words: Shack-Hartmann sensor, aberrations, short-focus lens.

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Radiophysics, 64/13, Volodymyrska st., Kyiv, Ukraine, 01601
e-mail: wlad@univ.kiev.ua.

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

Останні роки характеризуються розповсюдженням методів вимірювання фази оптичного хвильового фронту, відомих з адаптивної оптики та астрономії, в інші галузі науки та техніки [1]. Зокрема, відомі застосування сенсорів Шека-Хартмана для дослідження спотворень хвильового фронту в передавальній оптиці [2], контролю якості оптичних елементів та приладів [3], дослідження хвильових фронтів зі значними аберациями [4]. Сенсор Шека-Хартмана застосовується також для дослідження поверхонь [5]. Проте він має недолік, який обмежує його застосування: чим більша фокусна відстань матриці мікролінз, тим вища чутливість сенсора, але тим менший максимальний кут локального нахилу хвильового фронту, який можна виміряти [6]. Ці властивості сенсора Шека-Хартмана зумовлюють ускладнення алгоритмів вимірювань значних аберацій хвильового фронту, в тому числі і при визначенні параметрів короткофокусних лінз та об'єктивів. Такі лінзи утворюють хвильовий фронт зі значною кривизною, що приводить до необхідності використання в сенсорі матриць мікролінз з малою фокусною відстанню. Але аберації правильно спроектованої та

виготовленої лінзи можуть бути досить малі, що вимагатиме збільшення кутової чутливості сенсора а отже і фокусної відстані матриці. Один з шляхів вирішення цього протиріччя був запропонований в [4] для визначення кривизни відбиваючих поверхонь. Для компенсації надмірної кривизни поверхня освітлювалася розбіжною сферичною хвилею від вторинного джерела світла, а відбитий хвильовий фронт аналізувався сенсором Шека-Хартмана.

В даній роботі розглядається модифікація цього методу для визначення аберацій короткофокусних лінз малого діаметру. Ідея методу полягає в застосуванні точкового джерела світла для компенсації оптичної сили лінз та масштабуючої оптичної системи, яка служить для узгодження досліджуваної апертури з розміром фотоприймача в сенсорі.

Оптична схема установки

Оптична схема установки для вимірювання аберацій короткофокусних лінз зображена на рис. 1. В установці використовується плоский розширений пучок He-Ne лазера ($\lambda=632,8$ нм). Точкове джерело утворене об'єктивом 1 та точковою діафрагмою 2 діаметром 2 мкм. За

діафрагмою 2 розповсюджується розбіжна сферична хвиля. Після проходження через досліджувану лінзу 3, яка розміщена на фокусній відстані від точкового джерела, сферична хвиля перетворюється на квазіплоску, в якій відсутнє дефокусування, але присутні інші аберації, внесені лінзою. Сенсор Шека-Хартмана

складається з матриці мікролінз 6 з фокусною відстанню $F=24$ мм і розміром елементарної лінзи $0,4 \times 0,4$ мм та ПЗЗ-камери 7 з розміром пікселя $6,45 \times 6,45$ м та робочим полем 1024×1024 піксели.

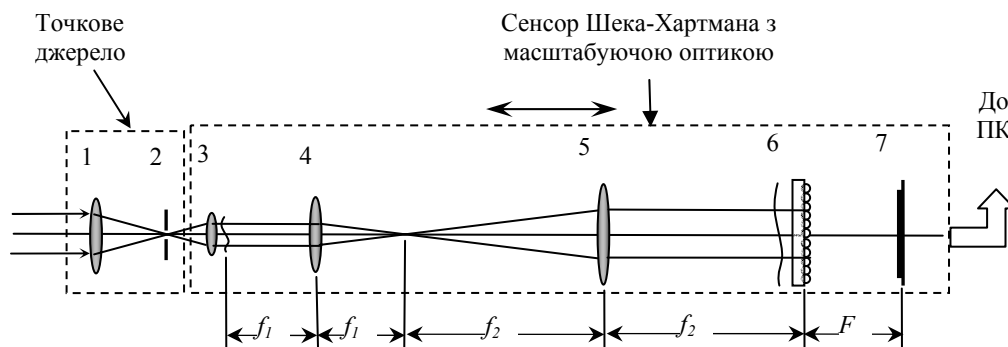


Рис. 1 – Оптична схема установки для вимірювання аберацій короткофокусних лінз: 1, 4, 5 – об'єктиви; 2 – точкова діафрагма 2 м; 3 – досліджувана лінза; 6 – матриця мікролінз; 7 – ПЗЗ камера. $f_2/f_1 = 2.143$; $F=24$ мм

Хвильовий фронт, утворений лінзою 3, проектується на сенсор Шека-Хартмана за допомогою масштабуючої оптичної системи 4, 5 з коефіцієнтом збільшення 2,143. Масштабуюча система служить також для узгодження досліджуваної апертури лінзи 3 з розміром матриці в ПЗЗ-камері 7. Сенсор Шека-Хартмана, масштабуюча оптична система та тримач досліджуваної лінзи утворюють єдину конструкцію, яка може рухатися вздовж оптичної осі системи за допомогою мікрометричного гвинта для точного суміщення фокусу досліджуваної лінзи з точковою діафрагмою.

Відновлення хвильового фронту проводилося модальним методом в базисі функцій Церніке.

Кутова чутливість сенсора, розрахована по ансамблю з 10 гартманогам, становила 3.5×10^{-5}

радіан, що відповідає мінімальному набігу фази $\lambda/40$ на апертурі $0,4 \times 0,4$ мм при $\lambda=0,6328$ м.

Вимірювання аберацій за допомогою описаної установки проводилося в кілька етапів.

1. Калібровка сенсора за допомогою лінз з відомими параметрами.
2. Отримання еталонної гартманогам за допомогою високоякісної лінзи з відомою фокусною відстанню.
3. Вимірювання аберацій досліджуваних лінз.

Калібровка сенсора

Для калібровки були використані астигматичні лінзи з відомими параметрами, які встановлювалися в оптичну схему рис. 1 на місце лінзи 3. При цьому вимірювання проводилися за допомогою плоского пучка. Їх результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вимірювання параметрів еталонних лінз для діаметра входної апертури 1,9 мм.

| Лінза | Паспортні дані | | | | | Результати вимірювань | | | | |
|-------|--------------------|---------------------|-------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | S (дптр) | C (дптр) | M (дптр) | Дефокус. (од. λ) | Аст. (од. λ) | Дефокус. (од. λ) | Аст. (од. λ) | M (дптр) | S (дптр) | C (дптр) |
| 1 | 0.75 ± 0.09 | -0.25 ± 0.12 | 0.625 | 0.436 | 0.174 | 0.438 ± 0.006 | 0.16 ± 0.01 | 0.63 ± 0.01 | 0.74 ± 0.02 | -0.23 ± 0.02 |
| 2 | 1.00 ± 0.09 | -0.25 ± 0.12 | 0.875 | 0.611 | 0.174 | 0.626 ± 0.006 | 0.17 ± 0.01 | 0.90 ± 0.01 | 1.02 ± 0.02 | -0.24 ± 0.02 |
| 3 | 2.00 ± 0.12 | 0.50 ± 0.12 | 2.25 | 1.57 | 0.349 | 1.48 ± 0.01 | 0.32 ± 0.02 | 2.12 ± 0.01 | 1.89 ± 0.02 | 0.46 ± 0.03 |

Сферична (S) та циліндрична (C) оптична сила розраховувалась за формулами [7]:

$$\begin{aligned} S_{(-)} &= M + J \\ C_{(-)} &= -2J \end{aligned} \quad (1)$$

для перших двох лінз (від'ємна циліндрична оптична сила) та

$$\begin{aligned} S_{(+)} &= M - J \\ C_{(+)} &= 2J \end{aligned} \quad (2)$$

для третьої лінзи (додатна циліндрична оптична сила). Тут

$$\begin{aligned} M &= \frac{\lambda}{2\pi} \frac{4}{a^2} C_2^0 \\ J &= \frac{\lambda}{2\pi} \frac{2}{a^2} \sqrt{(C_2^{-2})^2 + (C_2^2)^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

де C_2^0 - коефіцієнт дефокусування; C_2^{-2} та C_2^2 - коефіцієнти астигматизму; a - радіус апертури.

Слід зазначити, що виміряні та паспортні значення оптичної сили лінз співпадають в межах похибки сенсора, яка становила $\sim 0,02$ дптр. Величина коефіцієнтів абераций вищих порядків виявились меншою від розрахованої чутливості сенсора $\lambda/40$.

Отримання еталонної гартманограми

Вимірювання абераций в описаній установці проводиться шляхом порівняння гартманограм хвильових фронтів, створених досліджуваними лінзами, з гартманогомою хвильового фронту, створеного високоякісною еталонною лінзою з фокусною відстанню $f_0=26.9$ мм. При цьому фактично вимірюється різниця між аберациями цих лінз. Оскільки точно суміщення точкового джерела з фокальною площиною лінзи було утруднене, проводилася реєстрація гартманограм під час переміщення сенсора вздовж оптичної осі системи та їх порівняння з гартманогомою плоского хвильового фронту. Далі будувалась графік залежності положення сенсора від виміряного значення дефокусування і розраховувалось положення сенсора z_{inf}^0 , яке відповідає плоскому хвильовому фронту за еталонною лінзою (рис. 2). За отриманими експериментальними точками будувалось наближення кривої поліномом 2-го ступеня, з якого визначалося необхідне положення сенсора.

Для застосованої еталонної лінзи $z_{\text{inf}}^0 = 14.8$ мм. При встановленні вимірювальної

системи в дане положення за еталонною лінзою розповсюджувався плоский хвильовий фронт, гартманограми якого використовувались при вимірюванні абераций.

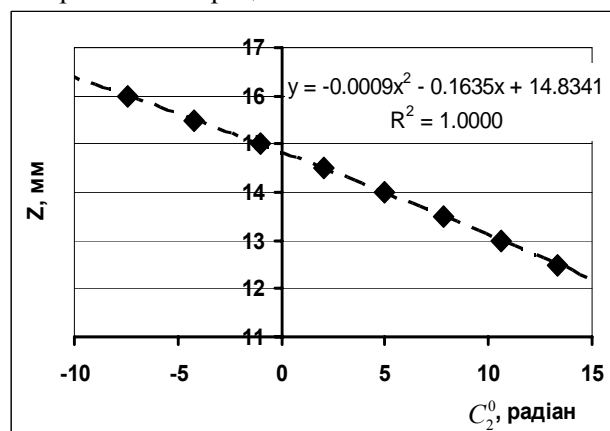


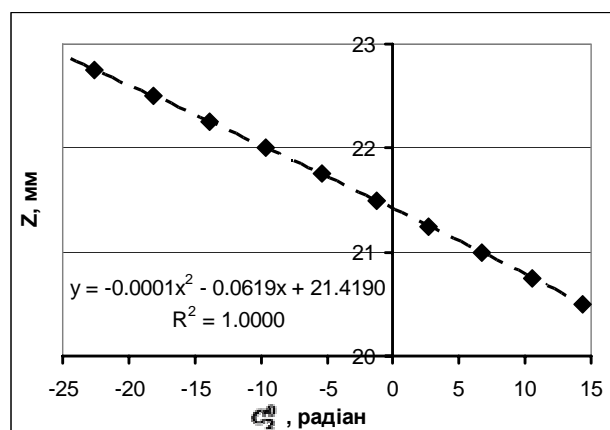
Рис. 2 – Визначення z_{inf}^0 для еталонної лінзи

Вимірювання фокусної відстані та абераций короткофокусних лінз

Для вимірювання абераций вимірювальна система з досліджуваною лінзою повинна встановлюватись в положення z_{inf}^i , в якому за лінзою розповсюджується квазіплоский хвильовий фронт з нульовим дефокусуванням. При цьому відповідні положення знаходились способом, описаним вище. Якщо відома фокусна відстань еталонної лінзи, можна визначити і фокусні відстані досліджуваних лінз f_i :

$$f_i = f_0 - (z_{\text{inf}}^i - z_{\text{inf}}^0), \quad (4)$$

Відповідну залежність для одної з досліджуваних лінз наведено на рис. 3.



б) $z_{\text{inf}}^1 = 21.4$ мм, $f_1 = 20.3$ мм

Рис. 3 – Визначення z_{inf}^i та f_i для досліджуваної лінзи

Одночасно з визначенням дефокусування визначалися і коефіцієнти інших аберацій. Графік для сферичної аберації наведено на рис. 4.

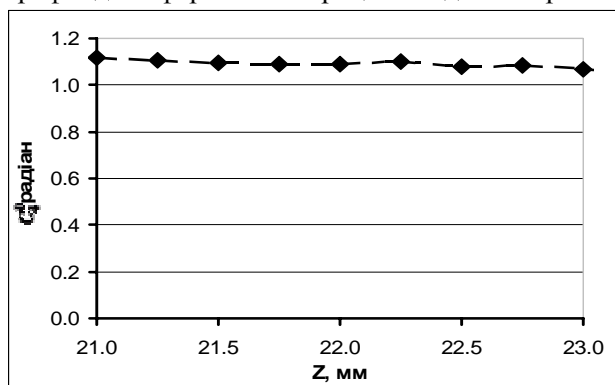


Рис. 4 – Залежність сферичної аберації від положення вимірювальної системи

Видно, що сферична аберация слабо залежить від невеликих зміщень вимірювальної системи відносно z_{inf}^1 . Вимірний коефіцієнт сферичної аберації при $z = z_{inf}^1$ становив 1,15 радіан, що відповідає різниці фаз $0,36\lambda$ в апертурі діаметром 3 мм.

На рис. 5 представлено тривимірну модель хвильових фронтів, що пройшов через лінзу.

Список використаних джерел

1. Tyson R. Principles of Adaptive Optics: 3rd ed. / R. Tyson. - CRC Press, 2010.
2. Mansell J.D. Evaluating the effect of transmissive optic thermal lensing on laser beam quality with a Shack-Hartmann wave-front sensor / Justin D.Mansell, Joseph Hennawi, Eric K.Gustafson [et al.] // Appl. Opt. – 2001. – 40, No.3. – P.366 – 374.
3. Mercère P. Hartmann and Shack–Hartmann Wavefront Sensors for Sub-nanometric Metrology / Pascal Mercère, Dr. Mourad Idir, Johan Floriot, Xavier Levecq // Modern Developments in X-Ray and Neutron Optics: Springer Series in optical science. - 2008. - 137. - P 219 – 232.
4. Podanchuk D.V. Wave-front sensor for metrological applications / Podanchuk D.V., Dan'ko V.P., Kisil A.V. [et al.] // Bulletin of the University of Kiev. Series: Physics & Mathematics. – 2001. – 3. - P. 392–399 [in Ukrainian].
5. Goloborodko A. Determination of local surface defects using a Shack-Hartmann wavefront sensor / Goloborodko A., Grygoruk V., Kurashov V. [et al.] // Ukr. J. Phys. – 2008.– 53. – P. 946 – 951.
6. Southwell W.H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements / W.H.Southwell // JOSA. - 1980. - 70, No 8. - P. 998 - 1006.
7. Thibos L.N. Power Vectors: An Application of Fourier Analysis to the Description and Statistical Analysis of Refractive Error / Larry N. Thibos, William Wheeler and Douglas Horner // Optometry & Vision Science. – 1997. – 74, No 6. – P. 367 – 375.

Видно, що досліджувана лінза має значну сферичну аберацию, яка спотворює хвильовий фронт.

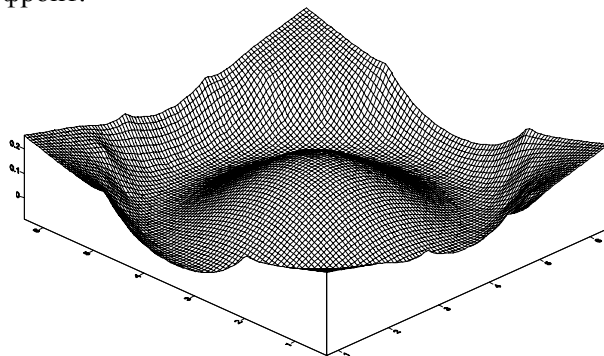


Рис. 5 – Тривимірний модель хвильового фронту, що пройшов через досліджувану лінзу

Висновки

Запропоновано та експериментально досліджено метод вимірювання аберацій короткофокусних лінз за допомогою точкового джерела світла та сенсора хвильового фронту Шека-Хартмана з масштабуючою оптичною системою. Кутова чутливість сенсора становить 3.5×10^{-2} мрад при коефіцієнті збільшення оптичної системи 2,143.

Надійшла до редколегії 30.04.13