

## 65. Голографический датчик волнового фронта с повышенной дифракционной эффективностью

И. А. Гуськов<sup>1,2</sup>, Э. Р. Муслимов<sup>1,3</sup>, А. Н. Мельников<sup>2</sup>, М. К. Бакшаев<sup>1</sup>, А. Р. Гильфанов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский университет им. А. Н. Туполева, Казань, Россия,

<sup>2</sup> АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

<sup>3</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, CNES, LAM, Marseille, France

В данной работе на примере простого датчика волнового фронта для трех aberrаций (дефокусировки, комы и астигматизма) демонстрируется алгоритм расчета систем такого типа, подразумевающий включение вычислений дифракционной эффективности в общий цикл расчета и моделирования. Показано, что рассчитанная голограмма обладает высокой и равномерной по апертуре дифракционной эффективностью, а также обеспечивает достаточно высокое качество изображения.

*Ключевые слова:* Голографический датчик волнового фронта, Дифракционная эффективность, Волновая aberrация.

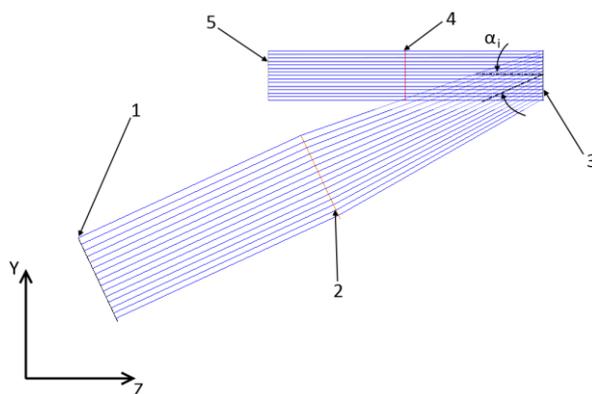
*Цитирование:* Гуськов, И. А. Голографический датчик волнового фронта с повышенной дифракционной эффективностью / И. А. Гуськов, Э. Р. Муслимов, А. Н. Мельников, М. К. Бакшаев, А. Р. Гильфанов // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 360–364.

### Введение

Датчик волнового фронта является основным компонентом любой системы адаптивной оптики. Наибольшее распространение получили датчики Шака — Гартмана, также применяются интерференционные и пирамидальные датчики. Однако все перечисленные типы датчиков объединяет необходимость обработки изображения, которая требует использования дополнительной аппаратуры и снижает быстродействие датчиков. Кроме того, указанные датчики отличаются сравнительно большими габаритами и массой [1].

Альтернативным решением является использование модального голографического датчика волнового фронта. Такой датчик может включать один оптический элемент. Он представляет собой наложенную голограмму нескольких эталонных волновых фронтов, каждый из которых характеризуется определенным типом aberrации. При работе такого датчика анализируемый волновой фронт будет разложен на несколько пучков. Измеряя относительную интенсивность дифрагированных пучков, можно определить вклад каждой из aberrаций. Таким образом, голографический датчик отличается компактностью и конструктивной простотой и позволяет непосредственно измерять aberrации без дополнительных вычислений [1, 2]. Датчики, построенные на данном принципе, были предложены более десятилетия назад, однако совершенствование их конструкции остается актуальной задачей [3, 4].

В частности, потенциальным недостатком подобных датчиков является снижение чувствительности вследствие низкой интенсивности формируемого голограммой изображения.



1, 5 — коллимированный пучок; 2 — объектив объектной ветви;  
3 — фоточувствительный слой; 4 — фазовая маска опорной ветви

Рис. 1. Принципиальная схема записи голограммы для датчика волнового фронта

Уменьшить данный нежелательный эффект можно путем оптимизации дифракционной эффективности голограммы при проектировании датчика. Однако геометрия записи и восстановления голограммы изменяется по апертуре. Данные изменения необходимо точно учитывать при проектировании, что требует разработки специальных алгоритмов и соответствующих программных средств.

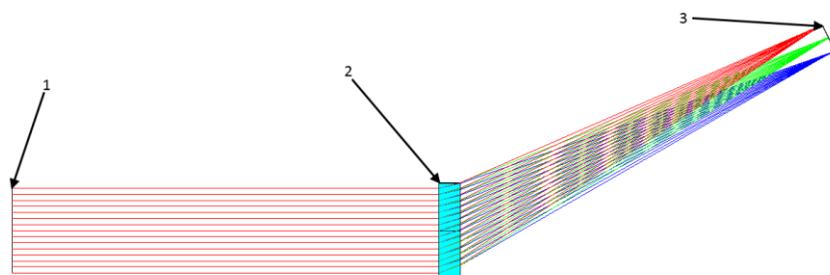
Соответственно, целью настоящего исследования является разработка и тестирование алгоритма расчета и моделирования голографического датчика волнового фронта с учетом изменения дифракционной эффективности по апертуре.

### 1. Расчет и оптимизация оптической схемы

В качестве примера рассматривается датчик волнового фронта для трех основных aberrаций: дефокусировки, вертикального астигматизма и меридиональной комы. Им соответствуют моды Цернике  $Z_4$ ,  $Z_6$  и  $Z_7$  [5]. Система работает на длине волны 589 нм ( $Na$ -лазер, используемый в астрономической адаптивной оптике).

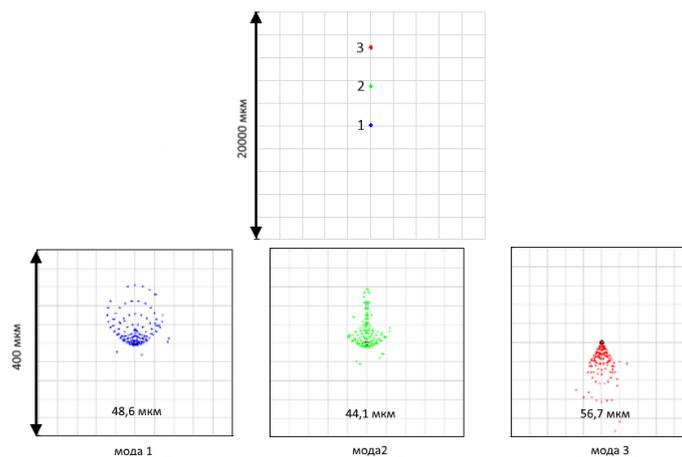
Процедура расчета схемы сходна с описанной в [6]. Расчет и моделирование проводится в среде Zemax. При этом предполагается, что голограмма является объемно-фазовой. Ее дифракционная эффективность вычисляется по соотношениям теории связанных волн Когельника [7] с помощью подпрограммы-макроста и включается в общую оценочную функцию. Такие параметры голограммы как толщина и глубина модуляции заранее определяются в цикле предварительной оптимизации. Далее приводятся результаты расчета и моделирования.

Схема записи для одной моды представлена на рисунке 1. Опорный пучок формируется фазовой маской и содержит информацию о данной aberrации. Объектный пучок определяет фокусирующие свойства голограммы и угол дифракции для соответствующей моды при анализе. Он формируется вспомогательным объективом, который при моделировании представляется идеальной положительной линзой с фокусным расстоянием 200 мм и относительным отверстием 1:5. Записываемая голограмма имеет световой диаметр 20 мм и фокусное расстояние 100 мм. Углы наклона объектного пучка для трех мод составляют значения  $\alpha = 25, 27$  и  $29^\circ$ .



1 — исследуемый волновой фронт; 2 — голограмма; 3 — плоскость фотоприемника

Рис. 2. Схема работы голографического датчика



1 — канал дефокусировки, 2 — канал астигматизма, 3 — канал комы

Рис. 3. Точечные диаграммы

Схема работы датчика показана на рисунке 2. На записанную наложенную голограмму падает анализируемый волновой фронт. В случае, если он содержит рассматриваемые моды, то каждая из них восстанавливает соответствующий объектный пучок. Голограмма формирует изображение точки с соответствующими координатами в фокальной плоскости. При этом интенсивность полученного изображения соответствует вкладу данной моды в общую волновую аберрацию анализируемого пучка.

Видно, что полученная схема отличается простотой и компактностью. Следует отметить, что при увеличении числа анализируемых мод принципиальные схемы записи и работы не изменяются. При анализе большого числа мод целесообразно заполнять формируемыми голограммой изображения прямоугольную область, для чего необходимо вносить в схемы записи разворот объектной ветви относительно оси  $Y$ .

Далее приводятся данные анализа качества изображения и дифракционной эффективности.

## 2. Анализ качества изображения

Для анализа качества изображения используются точечные диаграммы (см. рисунок 3). Среднеквадратический радиус диаграммы составляет 48,6; 44,1 и 56,7 мкм для мод дефокусировки, астигматизма и комы, соответственно.

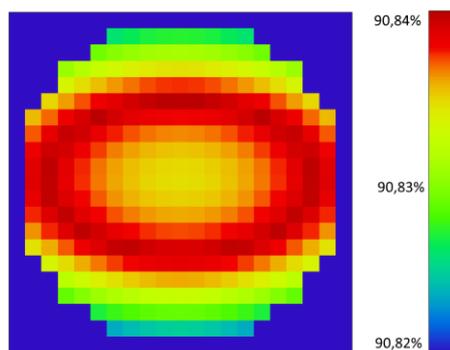


Рис. 4. Пространственное распределение дифракционной эффективности

Следует отметить, что в данном случае не предъявляются высоких требований к качеству изображения, поскольку используемый метод основан на измерении освещенности. С учетом данной особенности можно считать полученные характеристики качества изображения приемлемыми.

### 3. Анализ дифракционной эффективности

Расчет дифракционной эффективности включает два этапа. На предварительном этапе путем численной оптимизации определяются значения толщины слоя и глубины модуляции из условия максимума дифракционной эффективности на заданной длине волны. На втором этапе расчет и оптимизация дифракционной эффективности проводится для всей апертуры голограммы с учетом изменения геометрии записи и восстановления. В обоих случаях используется теория Когельника.

По результатам оптимизации были найдены следующие параметры голограммы: толщина слоя — 27 мкм, глубина модуляции — 0,011. Частота штрихов в вершине при этом равна 718, 771 и 823  $\text{мм}^{-1}$  для каждой из мод, соответственно. Важно отметить, что различия между модами незначительны, что позволяет использовать один и тот же режим записи для каждой голограммы.

На рисунке 4. представлены результаты моделирования пространственного распределения дифракционной эффективности.

Из рисунка 4 видно, что голограмма имеет высокую дифракционную эффективность, а ее изменение по апертуре пренебрежимо мало.

### Заключение

В настоящей работе продемонстрирован расчет голографического датчика волнового фронта. Представленный алгоритм отличается включением расчета дифракционной эффективности в процесс расчета и моделирования голограммного элемента.

На примере простого датчика для трех мод волновой аберрации было продемонстрировано, что использование предложенного алгоритма позволяет достичь высокой и равномерной по апертуре дифракционной эффективности при сравнительно высоком качестве изображения.

Повышение дифракционной эффективности голограммы позволит увеличить чувствительность датчиков и расширить их динамический диапазон. Дальнейшие исследования в данном направлении включают расчет датчика для большего числа мод и выполнение поверочного моделирования дифракционной эффективности с помощью точного численного метода.

#### Список источников

- [1] **Andersen, G.** Holographic wavefront sensor / G. Andersen, A. Reibel // Proc. of SPIE. — 2005. — Vol. 5894. — P. 589400.
- [2] **Corbett, A. D.** Designing a holographic modal wavefront sensor for the detection of static ocular aberrations / A. D. Corbett, T. D. Wilkinson, J. J. Zhong, L. Diaz-Santana // J. Opt. Soc. Am. A. — 2007. — Vol. 24. — № 5. — P. 1266.
- [3] **Loosen, F.** Holography-based modal wavefront sensor for the precise positioning of a light emitter using a high resolution computer-generated hologram / F. Loosen, J. Stehr, L. Albe et al. // IEEE Photonics Journal. — 2018. — Vol. 10. — № 1. — P. 6801211.
- [4] **Kong, F.** Improvements to the modal holographic wavefront sensor / F. Kong, A. Lambert // Applied Optics. — 2016. — Vol. 55. — № 13. — P. 3615.
- [5] **Lakshminarayanan, V.** Zernike polynomials: A guide / V. Lakshminarayanan, A. Fleck // Journal of Modern Optics. — 2011. — Vol. 58. — № 7. — P. 1678–1678.
- [6] **Guskov, I. A.** Optical design of a holographic head-mounted display with enhanced efficiency / I. A. Guskov, E. R. Muslimov // Proc. of SPIE. — 2018. — Vol. 10690. — P. 10690.
- [7] **Kogelnic, H.** Coupled wave analysis for thick hologram gratings / H. Kogelnic // Bell Syst. Tech. J. — 1969. — Vol. 48. — P. 2909–2947.