

# Искажения виртуального изображения в схемах НМД на волноводных голограммах

Н. А. Путилин<sup>1,2</sup>, С. Е. Дубынин<sup>1,4</sup>, А. Н. Путилин<sup>1</sup>, С. С. Копенкин<sup>1,3</sup>, Ю. П. Бородин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

<sup>3</sup> МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

<sup>4</sup> ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, Россия

Одним из быстроразвивающихся направлений современной оптики являются системы дополненной и смешанной реальности. Наибольшее распространение получили системы на основе волноводных голографических перископов. При изготовлении таких перископов и период, и ориентация волноводных голограмм могут не совпадать с расчетной величиной, поэтому практически важной задачей является определение допусков на эти отклонения. Особенно актуальным данный вопрос становится при переходе к массовому производству подобных систем. В настоящей работе рассматривается влияние различных параметров волноводных голограмм, а также самих волноводов, на качество формируемого виртуального изображения. Выделен ряд характерных искажений виртуального изображения.

*Ключевые слова:* Дисплей дополненной реальности, волноводная голограмма, виртуальное изображение, аберрации.

*Цитирование:* Путилин, Н. А. Искажения виртуального изображения в схемах НМД на волноводных голограммах / Н. А. Путилин, С. Е. Дубынин, А. Н. Путилин, С. С. Копенкин, Ю. П. Бородин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 144–148.

## Введение

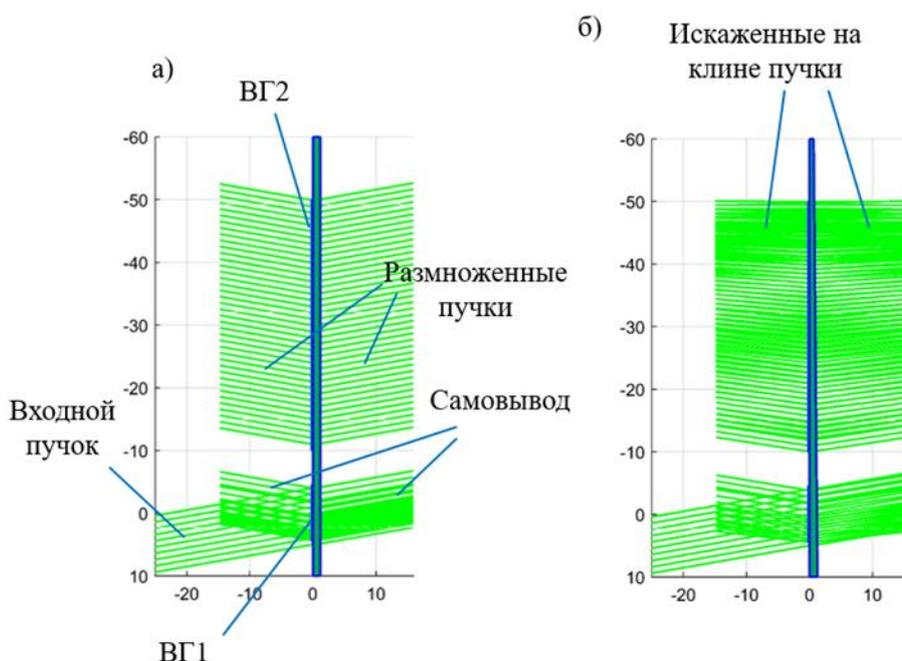
Оптические компоненты возможно разделить на два типа – изображающие и неизображающие. Неизображающие оптические компоненты смещают лучи перпендикулярно оптической оси проектора, не изменяя при этом их направления. К таким системам относят перископические системы на основе зеркал, призм или голографических волноводов. Последние получили наиболее широкое распространение в качестве элементов совмещения виртуального и действительного изображений – бим-комбайнеров (beam combiners – BC) [1, 2]. Однако при организации производства таких компонентов важно иметь оценки влияния параметров волноводных голограмм и самих волноводов на качество формируемого изображения. Ранее рассматривались отдельные узкие технологические вопросы, однако данная тема требует дальнейшей проработки [3].

## 1. Искажения в двухголограммной схеме

Наиболее простой является двухголограммная схема построения волноводного голографического бим-комбайнера [4]. В этой схеме (рис. 1 а)) вводная волноводная голограмма (ВГ1) и выводная (ВГ2) представляют дифракционные решетки с постоянным и равным периодом. Лучи, дифрагировавшие под углом большим угла ПВО в волновод, при

выводе дифрагируют под тем же углом, но в обратном направлении. Это позволяет получить на выходе неискаженный параллельный пучок, который был послан на ВГ1 после проектора. При этом в данной системе отсутствуют хроматические аберрации (при выдерживании постоянных и одинаковых периодов ВГ) [5]. При этом многократность вывода позволяет получить мультиплицированный (размноженный) зрачок.

Однако если присутствуют некоторые различия в периодах ВГ1 и ВГ2, или решетки фокусируют излучение (записаны не идеально плоскими волнами), то на выходе мы получим искаженный волновые фронты. Аналогичный эффект происходит, если волновод имеет клиновидность. На рис. 2 б) для наглядности приведен пример с клиновидностью  $30'$ , где аберрации лучей на выходе составляют до  $12^\circ$ . При этом можно видеть перемешивание пучков от отдельных выводов. Трассировка выполнялась в собственной программе, разработанной на базе среды MATLAB.



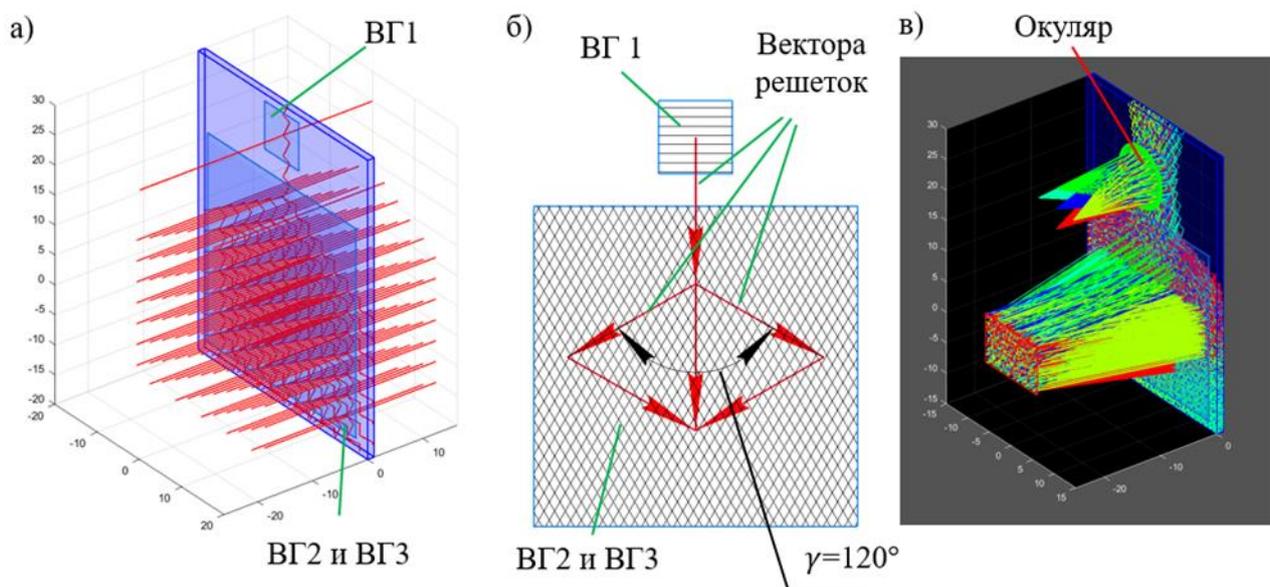
**Рис. 1.** Двухголограммная схема волноводного голографического перископа

Моделирование и практика показывают, что аберрации лучей на выходе на порядок превосходят величины клиновидности или иных отклонений формы и положения рабочих поверхностей волновода. Связано это с тем, что каждое переотражение усиливает возникшие угловые аберрации. На основе моделирования проводились оценки допусков на клиновидность, плоскостность, сферичность.

## 2. Искажения в трехголограммной схеме

Двухголограммная схема позволяет увеличить выходной зрачок только по одному направлению. При этом увеличение зрачка для неосевых пучков позволяет увеличить вынос выходного зрачка при сохранении малых габаритов проекционного объектива.

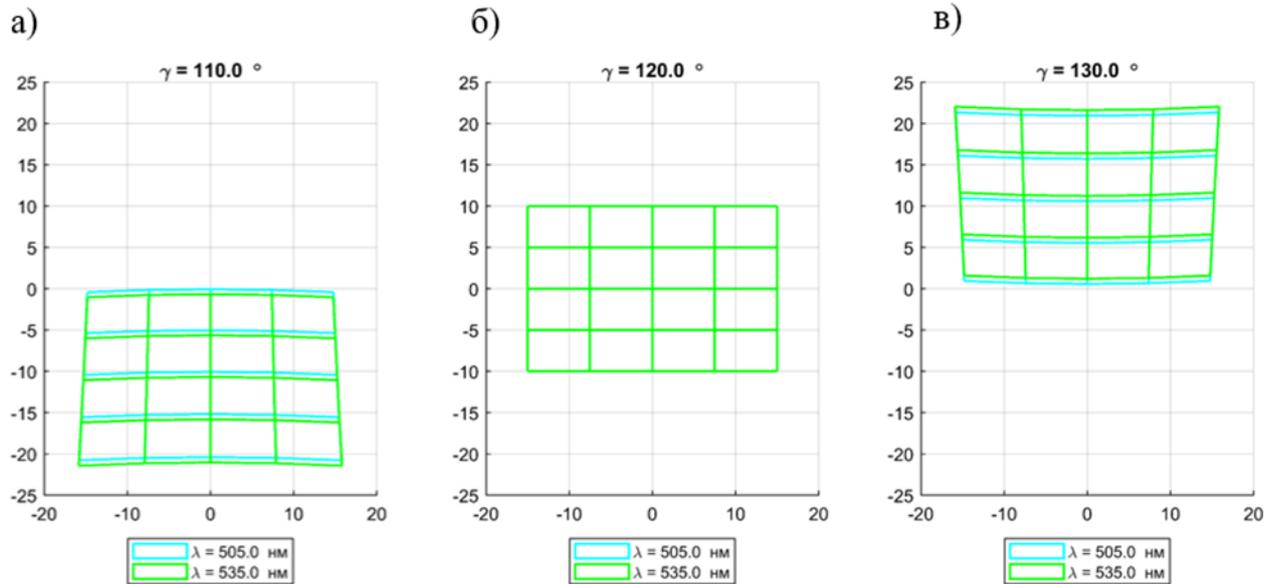
Для обеспечения компактности проекционной схемы по обоим направлениям используют трехголограммные схемы. На первой голограмме производится ввод излучения в волновод, после чего происходит мультипликация на двух голограммах по различным направлениям. Мультипликация может производиться последовательно, такая схема была использована фирмой Microsoft [1]. Большую компактность обеспечивает схема, предложенная фирмой WaveOptics [2], в ней мультипликация осуществляется на двух наложенных решетках, как показано на ри. 2 а). Вводная и выводные голограммы имеют одинаковые периоды, при этом угол  $\gamma$  между векторами решеток ( $|\vec{D}| = 2\pi \cdot \lambda/n$ ) составляет  $\gamma = 120^\circ$ . Вектора решеток в таком случае образуют замкнутый треугольник. Схема получается, как и описанная выше, ахроматической, то есть не вносящей хроматических aberrаций. На рис. 2 в) показана система с идеальным окуляром в качестве проектора.



**Рис. 2.** Трехголограммная схема, компоновка аналогична предложенной фирмой WaveOptics

Клиновидность волновода и отклонения от постоянства периодов ВГ вносят схожее влияние с рассмотренным выше случаем двухголограммной схемы. Однако в данном случае количество переотражений кратно увеличивается, следовательно, ужесточаются требования к волноводам.

Однако существует также еще один параметр – угол  $\gamma$  ориентации решеток. В ходе экспериментов было установлено, что его изменение не нарушает параллельности пучков на выходе для каждого угла поля, но изменяет углы на выходе. В результате при отправке изображений в виде тестовой сетки имеем картину, показанную на рис. 3. По осям отложены угловые величины изображения.



**Рис. 3.** Искажения изображения в схеме с наложенными решетками

В данном примере для наглядности вводились большие изменения в угол  $\gamma$  ( $\pm 10^\circ$ ). Можно видеть, что сильно изменяется средний угол вывода, также примерно на  $\pm 11^\circ$ . То есть при нормальном падении мы получаем вывод под другим углом. В смещенном изображении, кроме того, возникает заметная дисторсия, характерная в целом для неосевых систем.

Принципиально дисторсия может быть скомпенсирована программным образом. Однако, кроме этого, нарушается условия исправления хроматизма. На рисунках показано двоение изображения, возникающие для длин волн 505 нм и 535 нм. Это говорит о невозможности получения высокоразрешающих виртуальных изображений при использовании полихроматического источника излучения.

### Заключение

Приведен анализ искажений, возникающих в виртуальном изображении из-за отклонения формы волновода от идеальной, а также из-за погрешностей параметров записи волноводных голограмм. Выявлены характерные искажения для трехголограммной схемы с наложенными дифракционными решетками.

### Список источников

- [1] Kress B. C., Chatterjee I. Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective // Nanophotonics. 2020. V. 10. № 1. P. 41–74. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0410
- [2] Cheng D., Wang Q., Liu Y. et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: A review and outlook // Light: Advanced Manufacturing. 2021. V. 2. № 3. P. 350–369. DOI: 10.37188/lam.2021.024.
- [3] Solomashenko A., Kuznetsov A., Nikolaev V. et al. Development of a holographic waveguide with thermal compensation for augmented reality devices // Applied Sciences. 2022. V. 12. № 21. P. 11281. DOI: 10.3390/app122111281.

- [4] Shin B., Kim S., Druzhin V. et al. Eye-box expansion using waveguide and holographic optical element for augmented reality head-mounted display // Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR). SPIE. 2020. V. 11310. P. 142–147.  
DOI: 10.1117/12.254477.
- [5] Putilin A.N., Morozov A.V., Kopenkin S.S. et al. Holographic waveguide periscopes in augmented reality displays // Optics and Spectroscopy. 2020. V. 128. № 11. P. 1828–1836.  
DOI: 10.1134/s0030400x2011020x.

## **Aberrations of the virtual image in HMD based on waveguide holograms**

*N. A. Putilin<sup>1,2</sup>, S. E. Dubynin<sup>1,4</sup>, A. N. Putilin<sup>1</sup>, S. S. Kopenkin<sup>1,3</sup>, Y. P. Borodin<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup> Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia

<sup>3</sup> MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

Augmented and mixed reality systems are one of the rapidly developing areas of modern optics. The most widely used systems are based on waveguide holographic periscopes. They are classified as non-imaging optical system, that shifts the optical axis, without changing the direction of the beams. During the recording step both the period and the orientation of waveguide holograms may not coincide with the calculated value; therefore, determining the tolerances for these deviations is a practically important task. In this paper, we consider the influence of various parameters of waveguide holograms and waveguides themselves, on the quality of the formed virtual image. A number of characteristic distortions of the virtual image are identified.

*Keywords:* Augmented reality display, Waveguide hologram, Virtual image, Aberrations.