

Проблемы эффективности голографических волноводных дисплеев дополненной реальности

А. Н. Путилин¹, С. Е. Дубынин^{1,2}, А. В. Морозов¹, Н. А. Путилин^{1,3}

¹ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, Россия

³ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

Волноводные голографические перископы оказались одним из наиболее оптимальных оптических элементов для совмещения виртуального и реального изображений в схемах дисплеев дополненной реальности (AR). При этом большинство экспериментально проверенных схем дисплеев данного типа основаны на трехголограммной схеме с размножением зрачка по двум координатам и отличаются очень низкой эффективностью. В докладе произведен анализ возможных путей повышения световой эффективности волноводных голографических дисплеев. Рассмотрены альтернативные оптические схемы голографических волноводных неизображающих перископов, а также различные варианты построения оптических схем проекторов виртуального изображения. Экспериментально проверены несколько новых схем построения AR дисплеев.

Ключевые слова: Голографические оптические элементы, дисплеи дополненной реальности, волноводные голограммы.

Цитирование: Путилин, А. Н. Проблемы эффективности голографических волноводных дисплеев дополненной реальности / А. Н. Путилин, С. Е. Дубынин, А. В. Морозов, Н. А. Путилин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 139–143.

Введение

Системы дополненной реальности являются быстроразвивающимся направлением современной оптики, ввиду их высокой практической востребованности [1,2]. Ключевым элементом системы дисплея дополненной реальности является устройство совмещения световых пучков – бим-комбайнеры (beam combiners – BC). Волноводные голографические перископы имеют ряд преимуществ, что подтверждено их широким использованием в системах дополненной реальности [3]. Однако существует и ряд недостатков, в частности, низкая световая эффективность.

1. Причины низкой световой эффективности трехголограммной схемы

На рис. 1 показаны основные варианты схем волноводных голографических перископов, используемые в системах дополненной реальности [4]. На рис. 1 а) и 1 б) показаны трехголограммные схемы. Данные схемы впервые были использованы в серийных устройствах фирмами Microsoft и WaveOptics. Их различие состоит в том, что в первом случае мультипликация выходного зрачка производится по двум направлениям последовательно, во втором – одновременно на наложенных голограммах. Однако в обоих присутствует три

волноводные голограммы (ВГ) – вводная (ВГ1), и голограммы ВГ2 и ВГ3, обеспечивающие двумерную размножение зрачка.

На рис. 1 в) показана двухголограммная схема. Она может обеспечить увеличение размера выходного зрачка только по одной координате, то есть требует использования проекционного объектива большего размера. В связи с этим наибольшее распространение получили перечисленные выше трехголограммные схемы.

В общем случае, волноводные голограммы могут быть как рельефными, так и береговскими. Для повышения дифракционной эффективности (ДЭ) рельефных дифракционных решеток могут применяться несимметричные профили штрихов и вариации глубины решетки по площади волноводной голограммы. Но сначала необходимо рассмотреть общую конфигурацию конкретного типа ВГ, и рассмотрим схему только с точки зрения приближения геометрической конфигурации волноводных пучков.

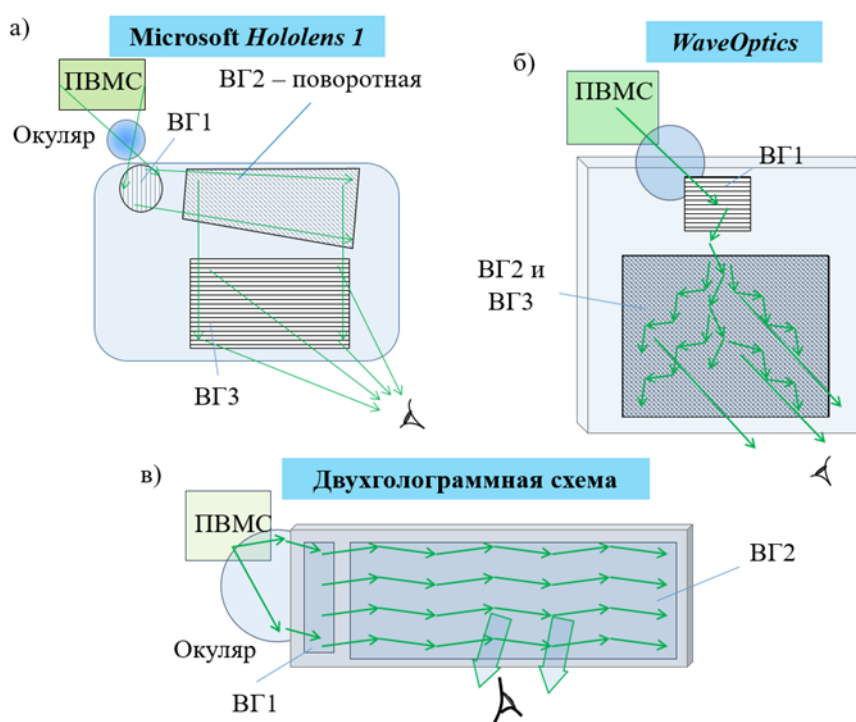


Рис. 1. Основные схемы построение волноводных голографических перископов

На рис. 2 показана вариация схемы WaveOptic, предложенная в ФИАН с диагональным расположением вводной и выводных решеток. Такая схема позволяет уменьшить общие габариты системы. Трассировка лучей выполнялась в специализированной программе собственной разработки.

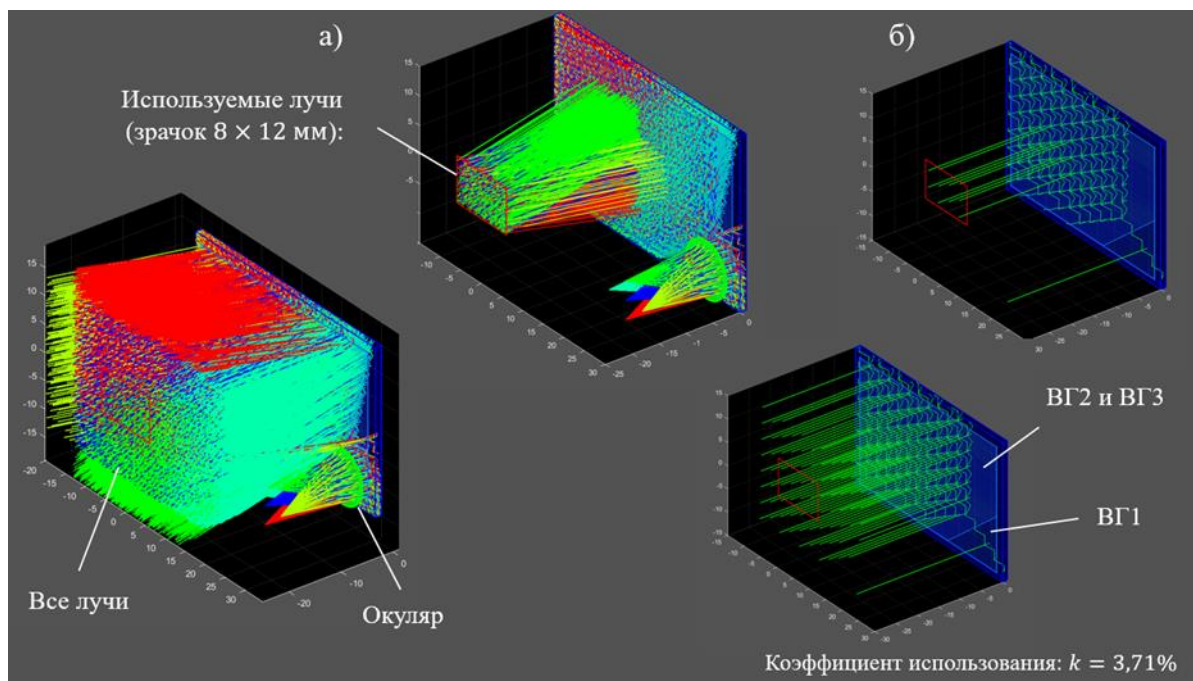


Рис. 2. Моделирование хода лучей в трехголограммной схеме с вводом с угла. (а) – пучки лучей по полю; (б) – размножение одного луча для фиксированного угла поля

На рис. 2(а) приведено сравнение двух вариантов трассировки лучей. В первом случае показаны все лучи, образуемые при дифракции в ± 1 -ые порядки. Во-втором варианте – лучи, попавшие в выходной зрачок с размером 8×12 мм. Данный рисунок наглядно демонстрирует, какое количество излучения не используется в данной схеме. Стоит отметить, что для рельефных симметричных профилей голографической решетки дифракция также идет и в сторону, противоположную от наблюдателя, что дополнительно уменьшает эффективность такого рода волноводных перископических дисплеев.

На рис. 2(б) для наглядности приведена трассировка для одного падающего луча, идущего под нормалью к поверхности. Число размноженных лучей на выходе $N_{\text{всe}} = 41349$ (с учетом только ± 1 -ых порядков дифракции), из них попадает в выходной зрачок: $N_{\text{всe}} = 1534$. То есть коэффициент использования: $k = 3,71\%$. То есть вне зависимости от типа регистрирующей среды и даже при оптимально распределении ДЭ по голограмме на выходе мы получаем суммарную эффективность работы бим-комбайнера порядка единиц процентов. Для ряда угловых полей она составляет еще меньше значения.

При этом число переотражений в области выводной решетки в данной схеме составляет 29, что приводит к заметному ослаблению чисто за счет потерь на поглощение в среде и при отражении.

2. Альтернативные схемы

В разы большей световой эффективностью обладает двухголограммная схема. На рисунке 3(а) показан вариант, полученный из расчета в обратном ходе лучей. В нем показан идеальный вариант проектора, который формирует только те пучки лучей, которые впоследствии попадут в выходной зрачок. Как можно видеть, данный проектор должен по своей схеме

заметно отличаться от привычных окуляров, работающих с симметричными выходными зрачками. При этом он может быть достаточно компактным. В рамках проводимых исследований были рассмотрены различные варианты построения оптических систем проекторов такого типа.

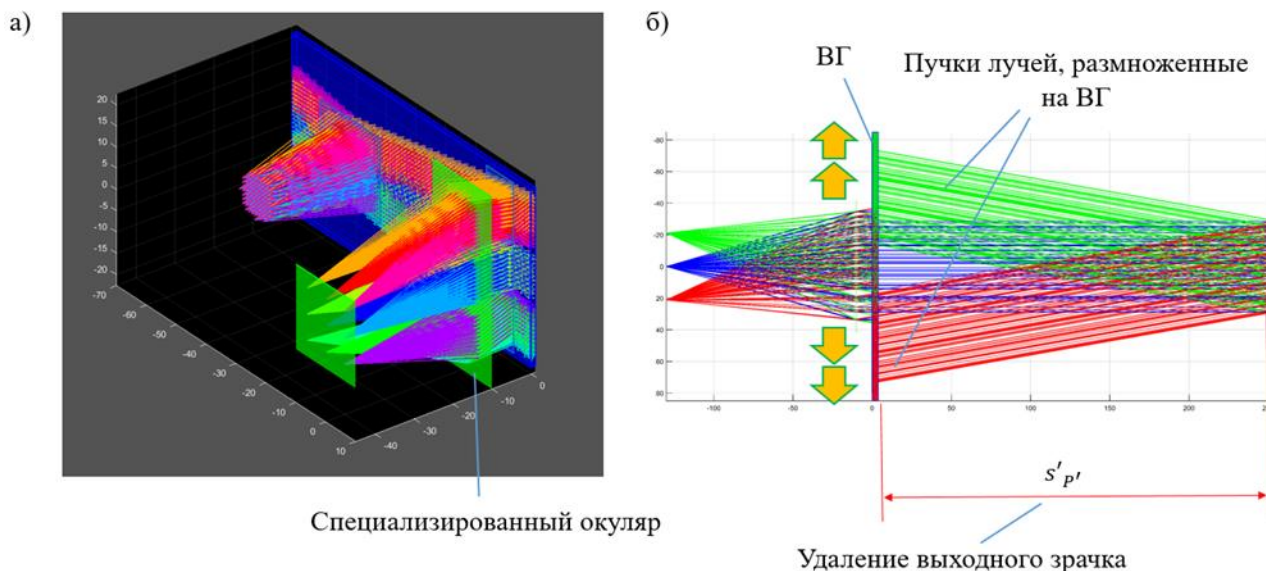


Рис. 3. Варианты двухголограммной схемы волноводного перископа

Вторым перспективным по мнению авторов направлением является использование двухголограммной схемы для мультипликации выходных зрачков обычных проекционных систем [5]. ВГ позволяет увеличить вынос (удаление) выходного зрачка $s'_{p'}$, при этом проекционная система остается достаточно компактной. Такая схема позволяет в разы уменьшить габариты собственно проекционной оптики. Хотя данное решение возможно использовать и для систем, работающих с некогерентным излучением всего видимого диапазона, более эффективным оно будет для систем, работающих с моноцветным изображением или изображением, формируемым RGB проектором.

В ходе работы был выявлен режим работы ВГ, при котором отсутствуют все другие порядки дифракции, кроме показанных на рис. 3(б). Это дополнительно позволяет увеличить суммарную световую эффективность.

Заключение

Были рассмотрены различные направления повышения световой эффективности работы волноводных голографических бим-комбайнеров в схемах дисплеев дополненной реальности. Показано, что использование трехголограммной схемы (при использовании обычных схем записи с получением одинаковых по всей площади голограммы дифракционных структур) приводит к заведомому ограничению суммарной эффективности работы бим-комбайнера. Двухголограммная же схема, несмотря на ряд недостатков, при использовании соответствующих проекционных систем и в селективных по режиму волноводной дифракции, может дать заметно большую суммарную световую эффективность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Kress B. C.** Optical architectures for augmented-, virtual-, and mixed-reality headsets. – 2020. <http://doi.org/10.1117/3.2559304>
- [2] **Rolland J.**, Cakmakci O. Head-worn displays: the future through new eyes //Optics and Photonics News. – 2009. – Т. 20. – №. 4. – С. 20-27. <http://doi.org/10.1109/JDT.2006.879846>
- [3] Kress B.C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations // Proc. SPIE 11062. Digital Optical Technologies. 2019. P. 110620J (16 July 2019). <http://doi.org/10.1117/12.2527680>
- [4] **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. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.024>
- [5] **Putilin A. N.** et al. Device for enlarging exit pupil area and display including the same : заяв. пат. 17090999 США. – 2021.

Efficiency problems in augmented reality displays based on waveguide holograms

A. N. Putilin¹, S. E. Dubynin^{1,2}, A. V. Morozov¹, N. A. Putilin^{1,3}

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

²Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

³Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia

The work is devoted to the investigation of improving the light efficiency of augmented reality (AR) displays based on holographic waveguide non-imaging periscopes. And also considered variations in the construction of optical schemes for projectors of a virtual image. The most of the experimentally tested schemes of this type of displays are based on a three-hologram scheme with pupil multiplication along two coordinates and are characterized by very low efficiency. The authors investigated alternative optical schemes of holographic waveguide nonimaging periscopes to reduce light losses and prevent the formation of irrelevant diffraction orders. Several new schemes of AR waveguide displays have been experimentally tested.

Keywords: Holographic optical elements, Augmented reality displays, Waveguide holograms.