

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-79-94

УДК 535.42, 778.38

# Искажения виртуального изображения в схемах дисплеев дополненной реальности на волноводных голограммах: возникновение тангенциальной дисторсии и хроматизма увеличения

Николай Андреевич Путилин<sup>1✉</sup>, Сергей Евгеньевич Дубынин<sup>2</sup>,  
Андрей Николаевич Путилин<sup>3</sup>, Сергей Сергеевич Копёнкин<sup>4</sup>,  
Юрий Петрович Бородин<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>1, 3, 5</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

<sup>4, 5</sup>МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

<sup>1</sup>nick.putilin.01@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5363-3176>

<sup>2</sup>dubyninse@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0452-5325>

<sup>3</sup>putilinan@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0492-0974>

<sup>4</sup>kopenkinss@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7572-4976>

<sup>5</sup>yuri.borodin47@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3021-2058>

## Аннотация

**Предмет исследования.** Волноводные голографические перископы и искажения виртуального изображения, возникающие в схемах дисплеев дополненной реальности. **Цель работы.** Определение основных источников возникновения искажений виртуального изображения, формируемого при помощи волноводного голографического перископа. Исследование выявленных специфических типов искажений. **Метод.** На первом этапе осуществлялось математическое моделирование различных вариантов погрешностей при изготовлении волноводных голографических перископов. Моделирование проводилось в приближении геометрической оптики с использованием векторных диаграмм, на основе чего в MATLAB реализована программа для симуляции виртуального изображения в схемах наголовных систем дополненной реальности на основе волноводных голограмм. Также использовалась специализированная программа для трассировки лучей, созданная авторами. На втором этапе были изготовлены и экспериментально исследованы образцы волноводных голографических перископов с заданными параметрами. **Основные результаты.** Установлено, что непостоянство периода волноводных голограмм и клиновидность волноводов приводят к возникновению искажений схожего характера, которые не могут быть вполне скомпенсированы проекционной системой. Погрешности в ориентации волноводных голограмм относительно друг друга, так же как и погрешности в их периодах, приводят к появлению тангенциальной дисторсии и хроматизма увеличения. Кроме того, сильно изменяется средний угол вывода излучения из волновода. **Практическая значимость.** Выявлены погрешности изготовления, которые приводят к появлению характерных искажений виртуального изображения, на основе чего получены оценочные требования к некоторым типам погрешностей изготовления волноводных голографических перископов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых схем дисплеев дополненной реальности.

**Ключевые слова:** волноводные голограммы, волноводные голографические перископы, искажения виртуального изображения, дисплеи дополненной реальности

**Благодарность:** коллектив авторов выражает благодарность Исследовательскому центру Самсунг в Москве за многолетнее и плодотворное сотрудничество.

**Ссылка для цитирования:** Путилин Н.А., Дубынин С.Е., Путилин А.Н., Копёнкин С.С., Бородин Ю.П. Искажения виртуального изображения в схемах дисплеев дополненной реальности на волноводных голограммах: возникновение тангенциальной дисторсии и хроматизма увеличения // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 3. С. 79–94. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-79-94>

Коды OCIS: 090.2820, 090.2890

# Distortions of the virtual image in augmented reality displays based on waveguide holograms: The arising of tangential distortion and magnification chromatism

NIKOLAY A. PUTILIN<sup>1</sup>✉, SERGEY E. DUBYNIN<sup>2</sup>, ANDREY N. PUTILIN<sup>3</sup>,  
SERGEY S. KOPENKIN<sup>4</sup>, YURIY P. BORODIN<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1, 3, 5</sup>Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

<sup>4, 5</sup>MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

<sup>1</sup>[nick.putilin.01@mail.ru](mailto:nick.putilin.01@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-5363-3176>

<sup>2</sup>[dubyninse@lebedev.ru](mailto:dubyninse@lebedev.ru) <https://orcid.org/0000-0003-0452-5325>

<sup>3</sup>[putilinan@lebedev.ru](mailto:putilinan@lebedev.ru) <https://orcid.org/0000-0003-0492-0974>

<sup>4</sup>[kopenkinss@yandex.ru](mailto:kopenkinss@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0001-7572-4976>

<sup>5</sup>[yuri.borodin47@yandex.ru](mailto:yuri.borodin47@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0003-3021-2058>

## Abstract

**Subject of study.** Waveguide holographic periscopes and virtual image distortions arising in augmented reality display circuits. **Aim of study.** Determination of the main sources of distortion in the virtual image formed by a waveguide holographic periscopic displays. Study of identified specific types of distortions. **Method.** At the first step, we used mathematical modeling for analyzing the influence of various errors arising in the process of manufacturing of waveguide holographic periscopes. The simulation was carried out in the geometric optics approximation with application of the vector diagrams method. We created a program for simulating a virtual image forming in head mounted of the display circuits based on waveguide holograms which uses the mentioned approaches. A specialized ray tracing program designed by the authors was also used. At the second step, the recording and experimental study of the samples of waveguide holographic periscopes with specified parameters were carried out. **Main results.** It has been defined that the inconstancy of the period of waveguide holograms and the wedge shape of the waveguides leads to distortions of a similar nature that cannot be fully compensated by the projection system. Errors in the orientation of waveguide holograms relative to each other, as well as errors in their periods, lead to the appearance of tangential distortion and magnification chromatism. The average output angle (angle of beams after the waveguide outcoupling) also changes greatly. **Practical significance.** We have identified the manufacturing errors that lead to specific distortions of the virtual image. The estimated requirements for certain types of errors in the waveguide holographic periscopes manufacturing process were determined. The results of the study can be used in the new designs development for augmented reality displays.

**Keywords:** waveguide holograms, waveguide holographic periscopes, virtual image distortion, augmented reality displays

**Acknowledgment:** the team of authors expresses gratitude to the Samsung Research Center for long-term and effective cooperation.

**For citation:** Putilin N.A., Dubynin S.E., Putilin A.N., Kopenkin S.S., Borodin Yu.P. Distortions of the virtual image in augmented reality displays based on waveguide holograms: The arising of tangential distortion and magnification chromatism [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 3. P. 79–94. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-79-94>

OCIS codes: 090.2820, 090.2890

## ВВЕДЕНИЕ

Системы дополненной реальности на данный момент являются одним из наиболее быстроразвивающихся направлений современной прикладной оптики [1–3]. Различают наголовные системы дополненной реальности, или HMD<sup>1</sup>, и системы «дисплей на лобовом стекле». Системы данного типа должны обеспечивать совмещение реального изображения (естественного изображения окружающей обстановки) и виртуального изображения (формируемого дисплейной системой). В связи с этим ключевыми элементами систем дополненной реальности являются оптические элементы совмещения реального и виртуального изображений — совместители пучков (СП).

Для создания СП используют оптические компоненты различных типов: зеркальные, призмные, поляризационные, голографические. Ведутся работы по использованию в качестве СП оптических элементов на основе метаповерхностей и жидких кристаллов [4, 5]. Однако наибольшее распространение на данный момент получили СП на основе волноводных голограмм, называемые волноводными голографическими перископами (ВГП) [6–8].

Они выполняют функции, схожие с теми, которые выполняют классические перископы: система не формирует изображение самостоятельно, как это происходит в обычных оптических системах (ОС), а изменяет положение выходного зрачка проекционной или приемной ОС, перемещая его в нужном направлении. Это позволяет отнести системы данного типа к неизображающим ОС. Однако помимо смещения выходного зрачка ВГП позволяют также в разы увеличить его размер, что делает возможным использование компактных проекционных систем. К преимуществам систем HMD на ВГП относятся компактность, малая масса, высокая прозрачность, достаточно большое угловое поле изображения (до 60–70°).

Стоит отметить, что существуют также и изображающие голографические СП — голограммные фокусирующие зеркала [9–11]. Однако, так же как в случае с эллипсоидальными полупрозрачными зеркалами, в таких системах требуется специальная нецентрированная проекционная ОС, что приводит к снижению технологичности и увеличению габаритов системы [12, 13]. Волноводные голографические перископы же, как правило, не требуют при своем использовании специальной проекционной системы, обеспечивая при этом минимальные размеры выходной апертуры проекционного объектива. При этом возможно использование комбинации СП на основе голограммного фокусирующего зеркала и ВГП [14].

Преимущества систем HMD на ВГП подтверждаются не только научными исследованиями, но также и тем, что целый ряд таких систем, находящихся в мелкосерийном производстве, основан на использовании ВГП, например, системы *Microsoft HoloLens 1* и *2*, *Vuzix Blade 1.5*, *Magic Leap One*, модели фирм *WaveOptics* и многие др. [15]. При этом ВГП ранее не находили еще широкого практического применения в иных областях. Потребности же в системах HMD соответствуют не мелкосерийному уровню производства, а серийному или даже массовому производству изделий данного типа.

С учетом изложенного выше можно сказать, что организация серийного и массового производства ВГП является новой актуальной задачей, решение которой должно стать предметом совместной работы ученых и инженеров. Одним из важнейших этапов при организации серийного производства изделия является определение допусков на погрешности изготовления. Соответственно, в случае с ВГП важно иметь оценки влияния параметров волноводных голограмм и самих волноводов на качество формируемого изображения. Ранее рассматривались отдельные узкие технологические вопросы, например, такие как влияние

<sup>1</sup> Head mounted display.

нагрева ВГП на качество изображения [16]. Рассмотрены также вопросы искажений в изогнутых волноводах, однако в данной работе [17] речь шла о придании таким образом изделию новых функциональных возможностей. Большая часть статей посвящена поиску новых схем ВГП с целью расширения углового поля, повышения компактности изделия и улучшения качества виртуального изображения [18, 19].

С учетом этого, целью данной работы являлись определение основных источников возникновения искажений виртуального изображения, формируемого с помощью ВГП, и исследование выявленных специфических типов искажений.

Для достижения поставленной цели предполагалось решить следующие задачи:

- рассмотреть принципы работы ВГП, сформулировать условия формирования ВГП безабберационного виртуального изображения,
- ввести классификации искажений виртуального изображения по их характеру, а также по их источникам,
- проанализировать влияние отдельных погрешностей изготовления ВГП на качество изображения, определив оценочные допуски на те или иные параметры ВГП,
- провести более детальное исследование влияния тех источников искажений виртуального изображения, которые ранее отдельно не рассматривались,
- выявить погрешности изготовления ВГП, которые могут быть скомпенсированы изменениями в проекционной системе дисплея.

## 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ВОЛНОВОДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ПЕРИСКОПОВ

В ВГП излучение распространяется внутри волновода, который обычно представляет собой плоскопараллельную пластину. Ввод излучения в волновод и его вывод осуществляются с помощью дифракционных решеток, изготовленных тем или иным способом на поверхности волновода. Далее будем называть их волноводными голограммами (ВГ), так как на практике они чаще всего изготавливаются голографическими (оптическими) методами.

Наиболее простой является двухголограммная схема ВГП (рис. 1а). В ней имеются две волноводные голограммы — вводная (ВГ1),

и выводная (ВГ2). Обе они являются дифракционными решетками с постоянным и одинаковым периодом  $d$ . Соответственно, векторы рассматриваемых дифракционных решеток равны  $\mathbf{D}_1 = \mathbf{D}_2 = \mathbf{D}$ , а их модуль —  $D = 2\pi/d$ . Векторы ориентированы перпендикулярно направлению, в котором осуществляется сдвиг выходного зрачка системы. Далее условимся векторы  $\mathbf{D}$  называть векторами волноводных голограмм, учитывая эквивалентность для рассматриваемых случаев терминов дифракционная решетка и волноводная голограмма.

Общеизвестная формула дифракции для волноводного случая имеет вид

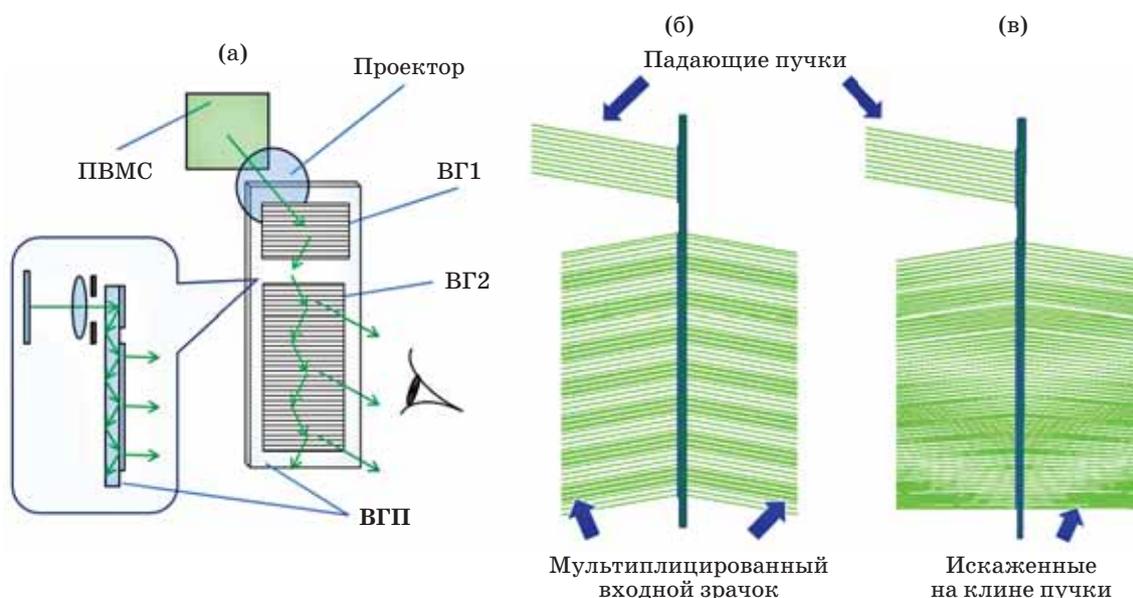
$$n \sin \alpha - \sin \beta = m \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

где  $\beta$  — угол падения светового луча на волновод,  $\alpha$  — угол в волноводе,  $m$  — порядок дифракции,  $\lambda$  — длина волны излучения в вакууме,  $n$  — показатель преломления материала.

Можно заметить, что углы распространения в волноводе излучений с различными длинами волн будут отличаться. Однако при выводе излучения на выводной голограмме происходит дифракция в тот же порядок, но в обратном ходе. Поэтому на выходе получается такой же угол, как и при вводе, что схематически показано на рис. 1а. При этом недифрагировавшая часть излучения продолжает распространяться по волноводу, в результате чего на выходе получается набор параллельных лучей от многократной дифракции на ВГ2.

Если для ввода излучения использовать комбинацию зеркальных и преломляющих поверхностей, то хроматизм выводной решетки окажется не скомпенсированным, что приводит к необходимости использования селективных по углу брэгговских голограмм [20]. Здесь и далее рассматриваются рельефные ВГ, не обладающие заметной селективностью ни по углам, ни по длине волны.

Выходной зрачок, сформированный ВГП, состоит как бы из множества отдельных зрачков, по этой причине его принято называть мультиплицированным [8]. Если проекционная система формирует изображение на бесконечности, то при увеличении размера апертуры проекционного объектива области параллельных пучков на выходе начинают перекрываться, что можно видеть на рис. 1б. Это означает, что



**Рис. 1.** Двухголограммная схема ВГП. Схема HMD (а). ПВМС — пространственно-временной модулятор света, ВГ1 — вводная волноводная голограмма, ВГ2 — выводная волноводная голограмма. Трассировки лучей через идеально плоский двухголограммный ВГП (б) и через ВГП с клиновидностью волновода (в)

**Fig. 1.** Two-hologram scheme of a waveguide holographic periscope. (a) Schematic of the head mounted display. ПВМС is a spatial light modulator, ВГ1 is the input waveguide hologram, ВГ2 is the output waveguide hologram, ВГП is the waveguide holographic periscope. Ray tracings (б) through the ideally flat two-hologram waveguide holographic periscope and (в) through the waveguide holographic periscope with a wedge-shaped waveguide

получен слитный выходной зрачок, в пределах которого будет наблюдаться виртуальное изображение.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ ВИРТУАЛЬНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И ИХ ТИПОВ

Выше рассматривался идеальный случай, когда на волновод падали абсолютно параллельные пучки, сам волновод представлял собой идеальную плоскопараллельную пластину, ВГ имели одинаковый и постоянный период дифракционной решетки. Для такого идеального случая ВГП является безабберационной системой, если рассматривать ее с точки зрения геометрии оптики. Однако любое отклонение от указанных выше допущений приводит к появлению искажений в виртуальном изображении.

Источниками искажений в виртуальном изображении могут быть погрешности изготовления волноводов (подложек для ВГ), aberrации проекционной оптики и погрешности изготовления волноводных голограмм.

В классической оптике при описании aberrаций обычно говорят о снижении качества изображения. При этом отмечается, что качество изображения характеризуется разрешающей способностью, т.е. способностью разделять точки предмета, а также коэффициентами контраста, коэффициентами интегрального и спектрального пропускания и другими параметрами [21]. К ухудшению качества изображения приводит появление сферической aberrации, комы, астигматизма. Однако, например, наличие дисторсии не снижает качество изображения, если понимать данный термин так, как было описано выше. Можно сказать, что происходит только искажение изображения. В этой связи предлагается ввести условную классификацию aberrаций на два типа: ухудшающие качество изображения (понижающие разрешающую способность), искажающие изображение.

При дальнейшем рассмотрении aberrаций виртуального изображения в ВГП будем учитывать предложенное разделение их на два данных типа.

## 2.1. Влияние погрешностей изготовления подложки

Для оценки влияния формы подложек на виртуальное изображение, строго говоря, необходимо рассматривать все используемые обычно допуски на отклонение формы и положения поверхностей: клиновидность в двух направлениях, появление сферичности, цилиндричности, локальных отклонений и др. Однако ограничимся рассмотрением наиболее тривиального случая — клиновидности в направлении распространения излучения. Клиновидность подложки далее будем характеризовать углом  $\theta$ .

Излучение, в геометрическом приближении, распространяется в волноводе зигзагом. Назовем одним переотражением возвращение луча на одну и ту же поверхность. Тогда при каждом переотражении плоского пучка лучей на клине угол в волноводе изменяется на угол  $\Delta\alpha = 2\theta$ . Следовательно, эти пучки лучей на выходе имеют разные углы  $\beta$ , при этом они перенакладываются в одной точке зрачка на выходе. Это приводит к появлению двоения изображения, а в ряде случаев и трояния [8]. После  $k$  переотражений угол в волноводе будет составлять  $\alpha_k = \alpha_0 - k\Delta\alpha$  (или  $\alpha_k = \alpha_0 + k\Delta\alpha$ , в зависимости от типа клина). Измененный угол на выходе определяется по формуле (1).

На рис. 16, в приведены примеры трассировки лучей через волновод с периодом 430 нм в случае излучения с  $\lambda = 532$  нм. Размер выводной области — 45 мм, толщина волновода 1,2 мм (это достаточно типичные параметры двухголограммного ВГП). Пучок падает под углом  $\beta = 10^\circ$ . Рисунок 16, как отмечено ранее — идеальный случай. Рисунок 1в — волновод с клиновидностью  $\theta = 26'$ . Количество переотражений для прохождения излучения по волноводу составило 19. На краю волновода угол вывода излучения из ВГ2 составляет  $-0,4^\circ$ , и лучи идут почти по нормали к поверхности, т.е. значение угловых aberrаций на всем размере ВГ2 в воздухе составляет уже  $10,4^\circ$ .

В данном случае специально была выбрана достаточно большая клиновидность для большей наглядности. Реальные же допуски на клиновидность вытекают из типичных требований к параметрам визуально воспринимаемого изображения, которые рассматривают-

ся в ряде классических книг по оптике [22]. В частности, для биноклей и зрительных труб считаются допустимыми суммарные монохроматические угловые aberrации по полю  $10'-30'$ . При количестве переотражений около 12 это означает допустимость клиновидности не более  $\theta = 25''-50''$ . Однако во многих типах ВГП количество переотражений может быть заметно выше, вплоть до 30 и более, тогда  $\theta = 10''-20''$ . С учетом того, что в данном случае не рассматриваются все другие источники погрешностей, кроме клиновидности, представляются рациональными требования к максимальной допустимой клиновидности волновода в диапазоне ее углов  $10''-30''$ , но не более этих значений.

Таким образом, очевидно, что наличие только одного типа клиновидности приводит к резкому падению качества изображения и росту aberrаций по выходному зрачку ОС. Их компенсация проекционной оптикой сильно затруднена из-за взаимного наложения волн по площади зрачка (двоение изображения). Следовательно, данные искажения относятся к aberrациям 1-го типа, ухудшающим качество изображения, т.е. понижающим его разрешение.

Аналогично можно рассмотреть и другие типы клиновидности голографических волноводных перископов.

## 2.2. Aberrации проекционной оптики

Любая ОС, имеющая конечные значения светосилы и углового поля, дает aberrационное изображение.

Аналогично случаю клина, любое отступление пучков лучей от параллельности на входе ВГП будет им многократно усиливаться, что быстро приводит к «разваливанию» изображения. Однако при идеальном ВГП наличие дисторсии не будет ухудшать качество изображения, так как плоские пучки не испытывают искажений в ВГП. Следовательно, разделение aberrаций на два типа, введенное для классической оптики, сохраняется и для данного случая.

## 2.3. Погрешности изготовления волноводных голограмм

Ранее отмечалось, что волноводные голограммы для ВГП на плоских волноводах представ-

ляют собой дифракционные решетки с постоянным периодом. Непостоянство периода волноводных голограмм возникает из-за отклонений волновых фронтов записывающих пучков от плоскостности и также приводит к падению качества изображения. Аналогичные локальные искажения в периодах наблюдаются и при литографических изготовлении дифракционных решеток.

Можно показать, что изменение (непостоянство) периода дифракционной решетки по площади волноводной голограммы вызывает эффект, схожий с искажениями виртуального изображения из-за погрешностей формы и положения поверхностей волновода. То есть для распределения периодов существуют аналогии клиновидности, сферичности, цилиндричности и др. Изучение их влияния является отдельной задачей и выходит за рамки этой работы. Перечисленные aberrации относятся к 1-му типу и заметно влияют на качество виртуального изображения.

Однако также существуют погрешности ориентации ВГ с постоянным периодом, например, вводной и выводной решеток. Ранее они отдельно не рассматривались, и ответ на вопрос о типе возникающих в таких случаях искажений не очевиден. Рассмотрим такие искажения подробнее в следующем разделе.

При этом отметим, что адекватный учет влияния всех перечисленных типов погрешностей представляет сложную инженерную задачу и не является целью данной работы. Во многих случаях, когда проводятся попытки выполнить такое моделирование, не учитываются некоторые тонкости, а именно

- многократный вывод излучения и мультипликация зрачка,
- малая толщина волноводов, используемых в современных схемах ВГП,
- комплексность влияния всех указанных факторов,
- особенности работы глаза в схеме НМД как приемной ОС.

Отсутствие учета ряда этих факторов делает проведенные исследования сложно применимыми на практике.

В рамках настоящей работы далее сосредоточимся только на одном из видов ВГП и ограничим круг рассматриваемых искажений виртуального изображения.

### 3. ТРЕХГОЛОГРАММНАЯ СХЕМА ВОЛНОВОДНОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ПЕРИСКОПА

#### 3.1. Схема работы трехголограммного волноводного голографического перископа и ограничения в его работе

Ранее двухголограммная схема была выбрана для рассмотрения как наиболее наглядная и простая. Однако ее использование требовало бы большиеразмерной проекционной оптики, так как размножение (мультипликация) зрачка выполняется данным типом ВГП только по одному направлению.

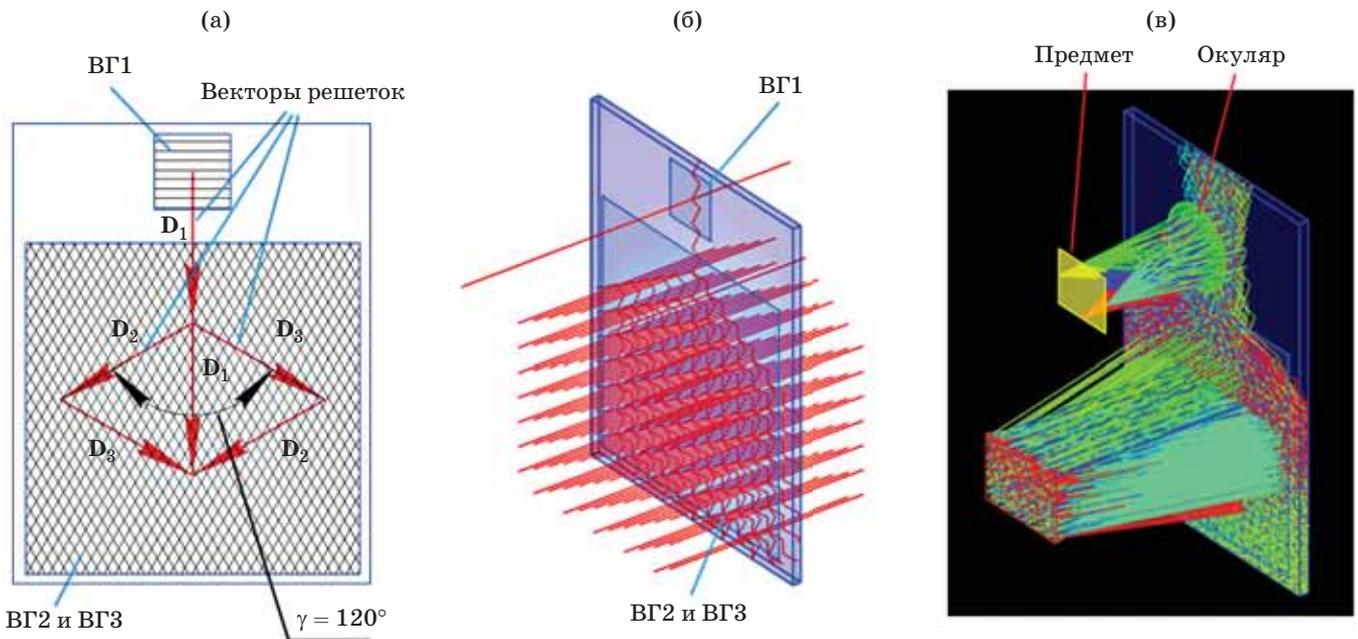
В связи с этим большее распространение получили трехголограммные схемы ВГП с двумерной мультипликацией выходного зрачка. Пример одной из таких схем приведен на рис. 2. Она активно используется фирмой *WaveOptics* и получила неофициальное название по имени этой фирмы.

В трехголограммной схеме (рис. 2а) ВГП представляет собой плоскопараллельную пластину с записанными на ней вводной волноводной голограммой (ВГ1) и наложенными выводными волноводными голограммами (ВГ2 и ВГ3). Для описания процесса дифракции в интегральной оптике традиционно используется не тригонометрическое, а векторное представление закона дифракции, согласно которому

$$\mathbf{K}_{2xy} - \mathbf{K}_{1xy} = m\mathbf{D}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{K}_2$  — волновые векторы лучей до и после дифракции ( $K_i = 2\pi n_i/\lambda$ ), а  $\mathbf{K}_{1xy}$  и  $\mathbf{K}_{2xy}$  — их проекции на плоскость, касательную к поверхности границы раздела сред в точке падения,  $\mathbf{D}$  — вектор дифракционной решетки ( $D = 2\pi/d$ ).

Схема дифракции излучения на наложенных волноводных голограммах имеет два варианта «пути» (рис. 2а). На схеме  $\mathbf{D}_1$ ,  $\mathbf{D}_2$  и  $\mathbf{D}_3$  — векторы ВГ1 (вводная) и ВГ2, ВГ3 (выводные) голограмм, угол между  $\mathbf{D}_2$  и  $\mathbf{D}_3$  составляет  $120^\circ$ , модули векторов равны между собой. Трассировка одного луча приведена на рис. 2б, который наглядно показывает процесс двумерной мультипликации луча. Рисунок 2в демонстрирует работу ВГП данного типа уже с пучками лучей, идущими под разными углами. Пучки лучей сформированы окуляром, работающим в обратном ходе лучей.



**Рис. 2.** Трехголограммная схема ВГП с наложенными решетками. Схема расположения волноводных голограмм (а). ВГ1 — вводная волноводная голограмма, ВГ2 и ВГ3 — наложенные выводные волноводные голограммы,  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  — векторы голограмм ВГ1, ВГ2 и ВГ3,  $\gamma$  — угол между векторами  $D_2$  и  $D_3$ . Трассировки одного луча через трехголограммный ВГП (б) и пучков лучей в схеме НМД дисплея на трехголограммном ВГП (показаны только лучи, попадающие в заданный выходной зрачок) (в)

**Fig. 2.** Three-hologram scheme of a waveguide holographic periscope with superimposed gratings. (a) Layout of waveguide holograms. ВГ1 is the input waveguide hologram, ВГ2 and ВГ3 are the superimposed output waveguide holograms,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  are the vectors of ВГ1, ВГ2 and ВГ3,  $\gamma$  is the angle between the vectors  $D_2$  and  $D_3$ . (б) Single ray tracing through a three-hologram waveguide holographic periscope and (в) tracing of ray beams in the head mounted display scheme on a three-hologram waveguide holographic periscope (only rays entering a given exit pupil are shown)

Для наглядности показаны только лучи, попадающие в выходной зрачок размером  $8 \times 12$  мм.

Угловое поле формируемого виртуального изображения является одним из важнейших параметров ОС дополненной реальности, наряду с размером выходного зрачка. Волноводный голографический перископ основан на волноводном распространении излучения, т.е. для его работы необходимо, чтобы угол  $\alpha$  лучей в волноводе был не меньше угла  $\alpha_{TIR}$  полного внутреннего отражения, т.е.

$$\alpha > \alpha_{TIR} = \arcsin(1/n_{WG}),$$

где  $n_{WG}$  — показатель преломления материала волновода.

Очевидно, что чем больше  $n_{WG}$ , тем меньше угол  $\alpha_{TIR}$  и больше угловой диапазон значений  $\alpha$ , а следовательно, и угловое поле си-

стемы  $2\omega$ . Однако оценка углового поля с использованием тригонометрической формы записи закона дифракции становится сложной, если начать рассматривать также косые пучки. Формула (1) рассматривает только меридиональное падение лучей (перпендикулярно штрихам решетки) и может быть обобщена для случая косого падения, но это не делает оценку значений углового диапазона более легкой [23].

Формула (2) справедлива для любых углов падения и весьма наглядно иллюстрируется с помощью сферы Эвальда. Данный метод широко используется в интегральной оптике [24]. Кроме того, зная показатели преломления сред, т.е. модули векторов  $K_i$ , можно легко визуально оценить значение угла дифракции. При этом на одном рисунке можно отобразить как волноводный диапазон углов распространения, так и диапазон углов распространения в воздухе.

Описанный подход широко используется для оценки углового поля ВГП, однако обычно ограничиваются схематичными рисунками [1, 6, 15, 18]. Авторами статьи была создана небольшая программа для оценки максимально возможного углового поля различных систем. Ее работу иллюстрирует рис. 3.

На рис. 3а (1) приведены проекции всех лучей, которые могут распространяться в воздухе в диапазоне  $\pm 90^\circ$ . Они представляют собой круг, ограниченный окружностью с радиусом  $R_1 = K_1 = 2\pi/\lambda$ , равным модулю волнового вектора падающего луча. Для удобства будем рассматривать дискретное, но очень большое число проекций векторов  $\mathbf{K}_{xy}$ , берущих начало в центре окружности и отображаемых в качестве точек на графиках.

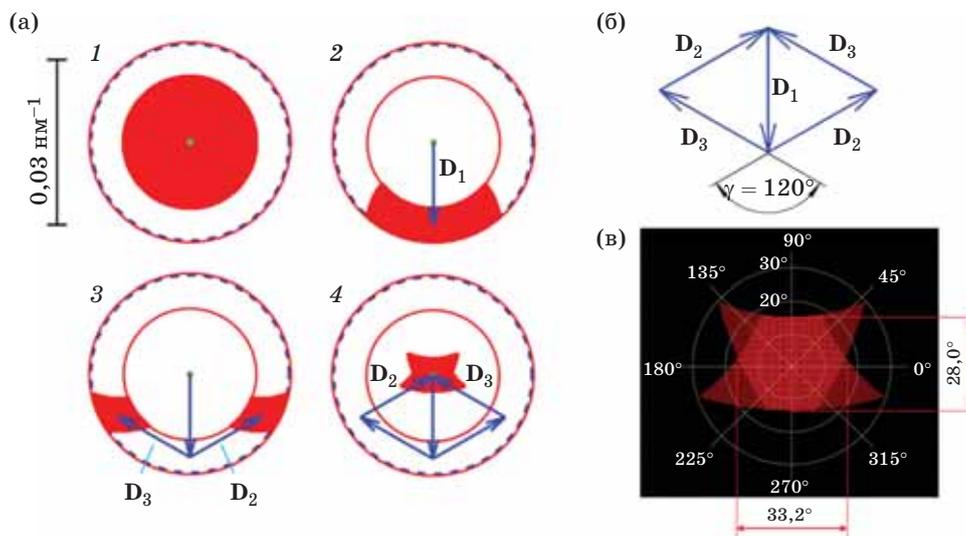
Согласно формуле (2) при дифракции на ВГ1 происходит смещение всех точек проекций векторов на  $\mathbf{D}_1$ . Распространяться в ВГП будут только волноводные лучи, лежащие между окружностями с радиусами  $R_1$  и

$R_2 = 2\pi(n_{WG}/\lambda)$ . В действительности также требуется ограничивать период точек возврата (расстояние между выходящими лучами на поверхности волновода) для получения слитного изображения, для чего вводится радиус  $R_3$ , легко определяемый исходя из заданного периода точек возврата, который обычно не превышает 10 мм.

Далее возможны два направления дифракции — векторы  $\mathbf{D}_2$  и  $\mathbf{D}_3$ . Если луч дифрагировал на ВГ2, то выведется он на ВГ3 и наоборот. На выходе получится набор проекций векторов  $\mathbf{K}'_{xy}$ , которые могут передаваться данным волноводом. Перейти к угловым значениям можно по следующей формуле:

$$\omega' = \arcsin\left(\frac{K'_{xy}}{R_1}\right) = \arcsin\left(\frac{K'_{xy}\lambda}{2\pi}\right), \quad (3)$$

где  $\omega'$  — угол луча на выходе ВГП с нормалью к поверхности волновода. Азимутальный угол, или направление луча в плоскости XY,

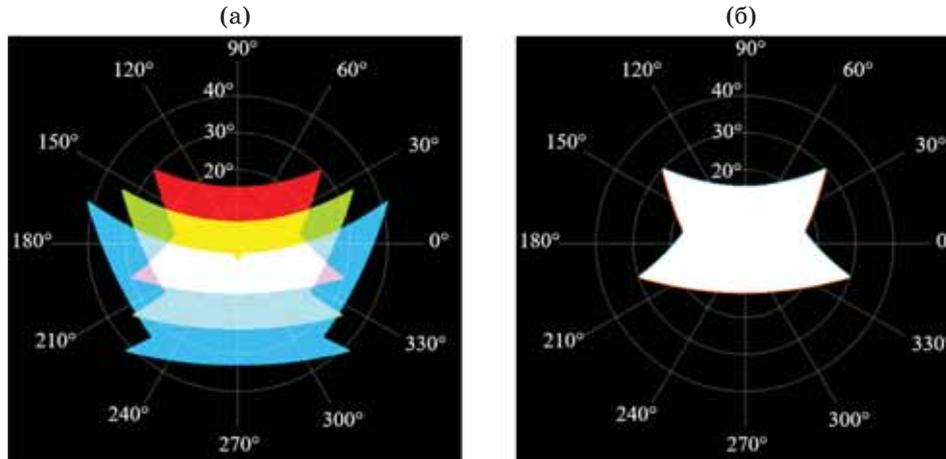


**Рис. 3.** Векторные диаграммы трехголограммной схемы ВГП. (а) Проекции волновых векторов лучей на плоскость волновода. 1 — все возможные лучи на входе в диапазоне  $\pm 90^\circ$ , 2 — дифракция на ВГ1, 3 — дифракция в волноводном режиме на ВГ2 и ВГ3, 4 — повторная дифракция на ВГ2 и ВГ3 — вывод излучения из волновода. (б) Схема дифракции.  $\mathbf{D}_1$ ,  $\mathbf{D}_2$  и  $\mathbf{D}_3$  — векторы ВГ1, ВГ2 и ВГ3. (в) Угловое поле, которое может передать ВГП. Радиальная ось — угловые поля, азимутальный угол — направление в пространстве выведенных лучей

**Fig. 3.** Vector diagrams for the three-hologram waveguide holographic periscope scheme. (a) Projections of wave vectors of rays onto a waveguide plane. (1) All possible beams at the input in the range of  $\pm 90^\circ$ , (2) diffraction at ВГ1, (3) diffraction in the waveguide on ВГ2 and ВГ3, (4) repeated diffraction on ВГ2 and ВГ3 (radiation output from the waveguide). (б) Diffraction scheme.  $\mathbf{D}_1$ ,  $\mathbf{D}_2$  and  $\mathbf{D}_3$  are the vectors ВГ1, ВГ2, ВГ3. (в) Angular field that can transmit waveguide holographic periscope. Radial axis is the field of view angles, azimuth angle is the direction in space for the extracted rays

**Таблица 1.** Оценка углового поля схемы для ее типичных параметров  
**Table 1.** Estimation of the scheme angular field of view for its typical parameters

Параметры	$n_{\text{WG}}$	$d$ , нм	$\lambda$ , нм	Толщина волновода, мм	Период точек возврата, мм	Угловое поле, град	
						по горизонтали	по вертикали
Их значения	1,52	500	630	2	10	33,2	28



**Рис. 4.** Формирование трехцветного изображения. Сравнение диапазонов угловых полей одноволноводной схемы, оптимизированной под красный цвет (а) и трехволноводной схемы с отдельными волноводами для трех цветов (б). Радиальная ось — углы поля зрения, азимутальный угол — направление в пространстве

**Fig. 4.** Formation of a three-color image. Comparison of angular field of view ranges for (a) the scheme with single-waveguide optimized for red color with (б) the three-waveguide scheme with separate waveguides for three colors. Radial axis are the angles of the field of view, azimuthal angle is the direction in space

определяется через соотношение координат по  $X$  и по  $Y$  для векторов  $\mathbf{K}'_{x,y}$ . Таким образом возможно получить оценку предельных значений углового поля.

Необходимо отметить, что в данной схеме цепочка векторов  $\mathbf{D}_1$ ,  $\mathbf{D}_2$  и  $\mathbf{D}_3$  является замкнутой (см. рис. 3б), т.е.

$$\mathbf{D}_1 + \mathbf{D}_2 + \mathbf{D}_3 = [0; 0]. \quad (4)$$

Любому углу на входе соответствует такой же угол на выходе. Это и есть условие получения безаберрационного изображения в ВГП.

Была выполнена оценка углового поля для типичных параметров схемы (см. табл. 1 и рис. 3в). Период  $d$  в данной схеме одинаков у волноводных голограмм ВГ1, ВГ2 и ВГ3. Считалось, что проектор расположен сверху (см. рис. 2а, в). Средний угол вывода равен нулю, т.е. диапазон углов от нормали практически симметричен. Это связано с тем, что данная

схема была изначально оптимизирована под нормальный вывод и под излучение с длиной волны 630 нм. Если попытаться получить с использованием этого ВГП трехцветное изображение, то мы увидим, что угловые диапазоны для разных длин волн излучения не совпадают, что видно на рис. 4а. Полноцветное (белое) изображение будет возможно сформировать только в узкой области, в которой перекрываются фигуры диапазонов углового поля для всех  $\lambda$ .

В связи с этим для получения цветного изображения используют сложенные вместе волноводы с различными периодами. Так, в случае рассматриваемой схемы перекрытие угловых полей достигается при  $d_G = 435$  нм (зеленый цвет  $\lambda_G = 550$  нм),  $d_B = 375$  нм (синий цвет  $\lambda_B = 475$  нм),  $d_R = 500$  нм (красный цвет  $\lambda_R = 630$  нм), что показано на рис. 4б.

Несовпадение угловых диапазонов для одного волновода является одним из основных источников возникновения окрашивания изо-

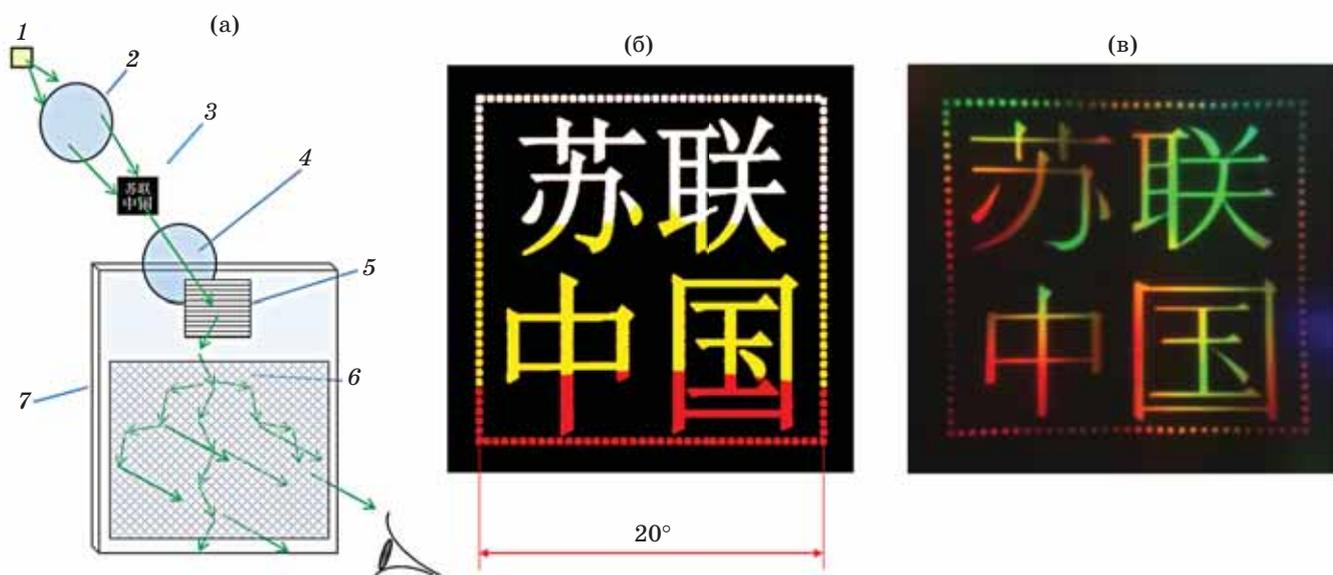
бражения. Однако стоит подчеркнуть разницу между окрашиванием изображения и хроматическими aberrациями. Окрашивание не приводит ни к двоению изображения, ни к падению его разрешения. Вопрос окрашивания — вопрос яркости изображения на заданной длине волны, а не aberrаций изображения.

### 3.2. Экспериментальная установка и симуляция изображения

Для практических исследований был собран макет НМД. Его схема приведена на рис. 5а. Он состоит из источника излучения, конденсорной ОС, транспаранта, окуляра и ВГП.

В качестве источника излучения использовалась комбинация светодиодов с максимумами спектральной плотности энергетической яркости на длинах волн, соответствующих красному, синему и зеленому цветам (RGB светодиод). В ходе экспериментов использовался ВГП, оптимизированный под красный цвет, с перечисленными в табл. 1 параметрами.

В качестве тестового объекта использовался амплитудный транспарант с записанным на него изображением в виде китайских иероглифов. Они означают «Советский Союз» и «Китай». Параметры проекционной системы приведены в табл. 2.



**Рис. 5.** Макет НМД на основе трехголограммного ВГП с одним волноводом и углом между векторами наложенных волноводных голограмм  $\gamma = 120^\circ$ . Схема экспериментальной установки (а). 1 — светодиод, 2 — конденсор, 3 — транспарант, 4 — окуляр, 5 — ВГ1, 6 — ВГ2 и ВГ3, 7 — ВГП на основе одиночного волновода с периодом ВГ 500 нм (под  $\lambda = 630$  нм). Симуляция изображения (б), угловое поле по диагонали  $28,3^\circ$ . Сформированное виртуальное изображение, фотография (в)

**Fig. 5.** Layout of a head mounted display based on a three-hologram waveguide holographic periscope with one waveguide and the angle between the vectors of superimposed waveguide holograms  $\gamma = 120^\circ$ . (a) Scheme of the experimental setup. (1) Light emitting diode, (2) optical lighting system, (3) transparency, (4) eyepiece, (5) ВГ1, (6) ВГ2 and ВГ3, (7) waveguide holographic periscope based on the single waveguide with the waveguide hologram period of 500 nm (for  $\lambda = 630$  nm). (б) Image simulation, the diagonal angular field of view is  $28.3^\circ$ . (в) Generated virtual image, photograph

**Таблица 2.** Параметры проекционной оптической системы

**Table 2.** Projection system optical parameters

Параметры	Линейный размер предмета, мм	Фокусное расстояние, мм	Угловое поле изображения по диагонали, град	Угловое поле изображения по горизонтали, град
Их значения	8,4	16,6	28,3	20

На рис. 5б демонстрируется симуляция формирования ВГП виртуального изображения с учетом приведенных выше соображений. При выполнении симуляции учитывался тот факт, что координата точки предмета  $y$  на выходе окуляра преобразовывается пропорционально тангенсу угла  $\omega' = \omega$ , и в таком виде изображение воспринимается человеком. Поэтому на рис. 5б и далее указаны не угловые величины, а тангенсы углов на выходе волновода —  $\text{tg}\omega'$ .

Изображение получено безабберационным, но с заметным окрашиванием из-за того, что использовался только один волновод и RGB освещение. Вводная голограмма располагалась сверху. На рис. 5б (симуляция изображения) можно видеть, что только излучение красного цвета с  $\lambda_R = 630$  нм присутствует по всему полю зрения. В области желтого цвета также присутствует излучение на длине волны  $\lambda_G = 550$  нм. Излучение на  $\lambda_B = 475$  нм присутствует только в верхней части изображения.

На рис. 5в представлена фотография виртуального изображения, сформированного реальным ВГП. Можно видеть, что излучение синего цвета практически отсутствует даже и в той части изображения, где оно могло бы быть. Это связано с тем, что в симуляции изображения на рис. 5б не учитывалась дифракционная эффективность ВГ, поглощение в волноводе, спектральное распределение яркости источника излучения и многие другие факторы. Оценивалась лишь принципиальная возможность наличия в данной точке излучения с заданной длиной волны. Однако можно видеть, что к нижнему краю реального изображения на рис. 5в зеленый цвет пропадает так же, как и на рис. 5б. Характерно, что, несмотря на использование весьма далекой от идеальности проекционной системы, виртуальное изображение имеет достаточно высокое разрешение по всему угловому полю.

#### 4. ИСКАЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТРЕХГОЛОГРАММНОЙ СХЕМЕ ВОЛНОВОДНОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ПЕРИСКОПА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УГЛА МЕЖДУ РЕШЕТКАМИ

В разделе 1 при рассмотрении различных типов искажений виртуального изображения было отмечено, что помимо погрешностей из-

готовления дифракционных решеток постоянного периода существуют также и погрешности их взаимной ориентации. Вопрос влияния поворота решеток относительно друг друга возник на практике: требовалось определить допуски на возможный взаимный поворот решеток.

Рассмотрим схему дифракции, возникающую при изменении угла  $\gamma$  между векторами  $\mathbf{D}_2$  и  $\mathbf{D}_3$ . Введем достаточно большие отклонения для выявления характерных искажений. Предположим, что  $\gamma = 115^\circ$ , сохранив прочие параметры ВГП. На рис. 6а можно видеть, что цепочка векторов, которая ранее была замкнутой, теперь перестала быть таковой. То есть нарушилось условие (4). При этом по-прежнему проекции векторов  $\mathbf{K}'_{xy}$  имеют одинаковое значение на всем угловом поле, но отличаются от входных волновых векторов  $\mathbf{K}_{xy}$  на вектор  $\Delta\mathbf{D}$ , равный  $\Delta\mathbf{D} = \mathbf{D}_1 + \mathbf{D}_2 + \mathbf{D}_3 = [0; 0,0009]$  нм<sup>-1</sup>. При этом модуль векторов  $D_1 = 0,01256$  нм<sup>-1</sup>, а  $R_{1R} = 0,01$  нм<sup>-1</sup> (для  $\lambda_R = 630$  нм).

Для  $\mathbf{K}'_{xy}$  можно записать, что  $\mathbf{K}'_{xy} = \mathbf{K}_{xy} + \Delta\mathbf{D}$ .

По формуле (3) можем найти, что угол луча на выходе ВГП будет составлять

$$\omega' = \arcsin\left(\frac{K'_{xy}}{R_1}\right) = \arcsin\left(\frac{|\mathbf{K}_{xy} + \Delta\mathbf{D}|}{2\pi}\lambda\right).$$

Рассмотрим частный случай — падение по нормали:  $\mathbf{K}_{xy} = [0; 0]$ ,  $\mathbf{K}'_{xy} = \Delta\mathbf{D}$ , откуда для  $\lambda_R = 630$  нм  $\rightarrow \omega'_R = \arcsin(\Delta D / (2\pi)\lambda_R) = 5,177^\circ$ , для  $\lambda_G = 550$  нм  $\rightarrow \omega'_G = \arcsin(\Delta D / (2\pi)\lambda_G) = 4,519^\circ$ , для  $\lambda_B = 475$  нм  $\rightarrow \omega'_B = \arcsin(\Delta D / (2\pi)\lambda_B) = 3,901^\circ$ .

То есть из-за того, что  $\mathbf{K}'_{xy} \neq \mathbf{K}_{xy}$ , лучи на разных длинах волн идут под разными углами, которые при этом не совпадают с углом на входе.

При этом для каждой длины волны лучи, упавшие под определенным углом к поверхности, на выходе останутся параллельным пучком и выйдут под углом  $\omega'$ .

Симуляция изображения, приведенная на рис. 6б для угла между векторами наложенных ВГ  $115^\circ$ , показывает, во что выливаются обнаруженные выше изменения в углах  $\omega'$  на выходе.

Установлено, что в изображении появился очень заметный хроматизм увеличения, кото-

рый составляет порядка градуса ( $\Delta\omega'_{R-B} \approx 1,2^\circ$ ). Также в изображении появилась ярко выраженная тангенциальная дисторсия, при этом средний угол излучения на выходе изменился и составил  $\omega'_{mid} \approx 4,5^\circ$ .

Для проверки результатов моделирования был изготовлен образец ВГП с заведомо измененным значением угла  $\gamma = 115^\circ$ . Сформированное таким ВГП изображение приведено на рис. 6в. Данные эксперимента в точности совпали с выдвинутыми предположениями.

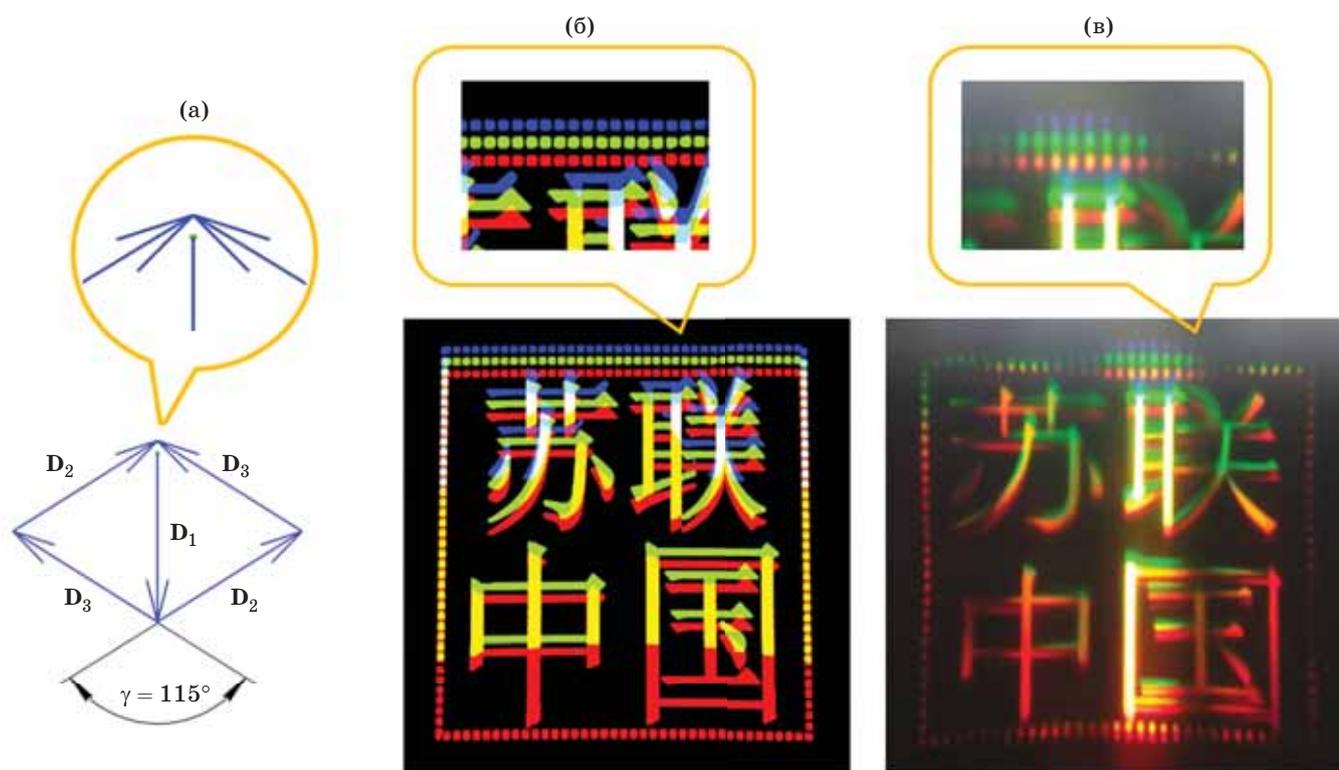
На рис. 6в. увеличен фрагмент изображения, на котором хорошо виден хроматизм увеличения. Использовался белый светодиод, имеющий неравномерное распределение энергетической яркости по длине волны, поэтому присутствуют максимумы на длинах волн красного, зеленого и синего цветов. Это дополнительно добавило сходства с моделью, в которой на данный

момент для симуляции использовалась квази-монохроматическая модель источника с излучением на трех длинах волн.

После обнаружения данного характерного режима искажения изображения было проведено моделирование для еще больших углов поворота векторов  $D_2$  и  $D_3$  относительно друг друга. Результаты представлены на рис. 7 для тестового изображения в виде прямоугольной сетки. Угловой размер изображения —  $37,8^\circ$ , отношение сторон стандартное — 16:9.

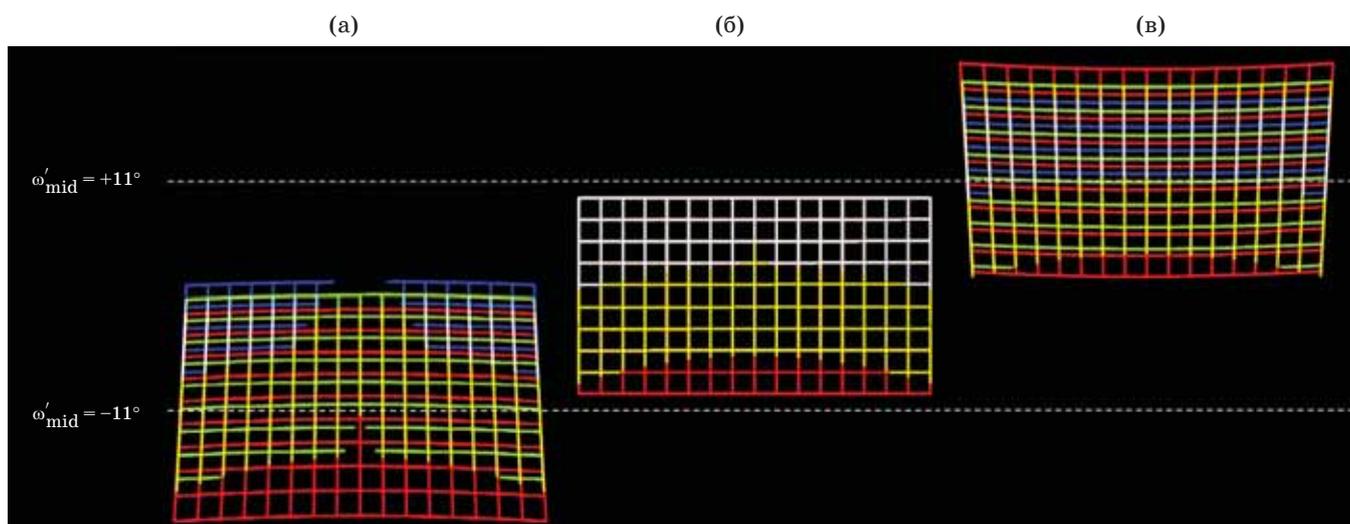
На рисунке приведены средние углы вывода излучения  $\omega'_{mid}$ . Их значения составили  $\pm 11^\circ$  при изменении  $\gamma$  на  $\pm 10^\circ$ , то есть сдвиг составил около половины углового поля изображения в вертикальном направлении.

Выявленные искажения виртуального изображения относятся ко 2-му типу аберраций: они не ухудшают качества изображения, но искажают его.



**Рис. 6.** Искажения в схеме с углом между векторами наложенных волноводных голограмм  $115^\circ$ . Схема дифракции в векторном виде (а). Цепочка векторов не замкнута, что является причиной возникновения хроматизма увеличения. Симуляция изображения (б). Увеличен фрагмент, где хорошо виден возникший в изображении хроматизм увеличения. Сформированное виртуальное изображение, фотография (в)

**Fig. 6.** Distortions in a circuit with an angle between the vectors of superimposed waveguide holograms of  $115^\circ$ . (a) Diffraction diagram in vector form. The chain of vectors is not closed, which is the reason for the occurrence of magnification chromatism. (б) Image simulation. The magnification chromatism in the image is clearly visible in the enlarged fragment of image. (в) Generated virtual image, photograph



**Рис. 7.** Искажения при углах  $\gamma$ , равных 110 (а), 120 (б) и 130° (в). Угловой размер тестового изображения — 37,8°, отношение сторон 16:9.  $\omega'_{\text{mid}}$  — средний угол вывода излучения из волновода

**Fig. 7.** Distortions for the angles  $\gamma$  (а) 110, (б) 120, (в) 130°. The angular size of the test image is 37.8°, aspect ratio 16:9.  $\omega'_{\text{mid}}$  — average angle of radiation output from the waveguide

Могут быть возражения, касающиеся хроматизма увеличения, так как данная аберрация снижает разрешение изображения. Однако оно по-прежнему остается на бесконечности и не имеет монохроматических аберраций. В связи с этим, если используется источник излучения с достаточной монохроматичностью, то можно получить на выходе три отдельных изображения на разных длинах волн. Эти изображения могут быть совмещены программным образом на пространственно-временном модуляторе света. В ходе экспериментов использовался амплитудный транспарант, где выполнить такую компенсацию было невозможно. Тем не менее, отдельные достаточно четкие изображения разного цвета были получены даже при использовании RGB светодиодов с весьма широким спектром.

Если не использовать компенсацию хроматизма изображения с помощью предсказанного предмета, то качество (предельное угловое разрешение) изображения будет определяться хроматизмом увеличения. Хорошим считается изображение, в котором хроматизм увеличения не превышает 3'–5' [22]. В данной схеме  $\Delta\omega'_{R-B}$  почти не меняется по полю зрения и ее можно оценить для луча, падающего на ВГП по нормали, как это было ранее сделано. Значению  $\Delta\omega'_{R-B} = 5'$  соответствует отклонение угла между дифракционными

решетками от расчетного  $\Delta\gamma = \pm 0,6^\circ$ . Симуляция изображения говорит об удовлетворительности качества изображения при заданных значениях  $\Delta\gamma$ , что также подтверждается в ходе экспериментов. Таким образом, допуск на неопределенность значения угла  $\gamma$  составляет  $\Delta\gamma = \pm 0,2^\circ - 0,6^\circ$ .

Компенсация дисторсии изображения программными методами широко применяется и не вызывает серьезных затруднений.

В данной работе рассматривалось влияние изменения угла  $\gamma$  на искажения изображения. Аналогичного эффекта можно добиться, изменяя периоды ВГ2 и ВГ3, так как в данном случае условие (4) также будет нарушаться, но пучки на выходе будут оставаться параллельными. Это связано с тем, что по площади волновода нет параметров, которые бы менялись от конкретного положения луча.

Следовательно, можно говорить о том, что изменение ориентации и периодов решеток в волноводных схемах (при сохранении постоянства их периодов по площади волновода) приводит к возникновению тангенциальной дисторсии и хроматизма увеличения.

## ВЫВОДЫ

В ходе работы выявлены следующие условия формирования ВГП на плоских подложках

безабберационного (дифракционно ограниченного) изображения: проекционная оптическая система формирует безабберационное изображение на бесконечности, отсутствуют искажения формы подложки, периоды ВГ постоянны по всей их площади, для векторов ВГ выполняется равенство

$$D_1 + D_2 + \dots + D_i = [0; 0].$$

Последнее требование можно назвать условием замкнутости цепочки векторов ВГ, образующих ВГП.

В процессе работы определены основные источники искажений виртуального изображения ВГП, введена классификация aberrаций виртуального изображения на два основных типа (ухудшающие разрешение, искажающие изображение).

Установлено, что погрешности формы подложек волновода, а также непостоянство периодов ВГ по их площади приводят к появлению aberrаций 1-го типа, компенсация их изменениями в проекционной системе крайне затруднена. Погрешности во взаимной ориентации ВГ, а также в средних периодах голограмм приводят к появлению искажений 2-го типа, которые, как правило, могут быть скомпенсированы программным образом.

Влияние погрешности ориентации ВГ рассмотрено на примере трехголограммной схемы с наложенными ВГ. При изменении угла между наложенными ВГ наблюдались ярко выраженный хроматизм увеличения и тангенциальная дисторсия, выявленные при моделировании в собственной специализированной программе и далее обнаруженные экспериментально в процессе макетирования голографической системы дополненной реальности. Их значения совпали с достаточно высокой точностью.

Выполнены оценки диапазонов углового поля, которое обеспечивает ВГП выбранного типа при заданных параметрах. Изменение ориентации наложенных решеток приводило к заметному изменению диапазона углового поля (среднего угла вывода). Это может быть использовано при разработке новых схем ВГП для улучшения эргономичности и при разработке новых вариантов компоновки систем НМД.

В ходе работы получены оценочные требования к ряду параметров ВГП, основанные как на выполненном компьютерном моделировании, так и на экспериментальных данных. Полученные значения допустимых погрешностей изготовления ВГП приведены в статье.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Xiong J., Hsiang, E.L., He Z., et al. Augmented reality and virtual reality displays: Emerging technologies and future perspectives // *Light: Sci. & Appl.* 2021. V. 10. № 1. P. 216. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00658-8>
- 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>
- Chang C., Bang K., Wetzstein G., et al. Toward the next-generation VR/AR optics: A review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective // *Optica.* 2020. V. 7. № 11. P. 1563–1578. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.406004>
- Li Z., Lin P., Huang Y.W., et al. Meta-optics achieves RGB-achromatic focusing for virtual reality // *Sci. Advances.* 2021. V. 7. № 5. P. eabe4458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe4458>
- Xiong J., Wu S.T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: From fundamentals to applications // *ELight.* 2021. V. 1. № 1. P. 3. <https://doi.org/10.1186/s43593-021-00003-x>
- Kress B.C., Pace M. Holographic optics in planar optical systems for next generation small form factor mixed reality headsets // *Light: Advanced Manufacturing.* 2022. V. 3. № 4. P. 771–801. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.042>
- Kress B.C., Peroz C. Optical architectures for displays and sensing in augmented, virtual, and mixed reality (AR, VR, MR) // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11310. P. 1131001. <http://doi.org/10.1117/3.2559304>
- Путилин А.Н., Морозов А.В., Копенкин С.С. и др. Голографические волноводные перископы в дисплеях дополненной реальности // *Опт. и спектроск.* 2020. Т. 128. № 11. С. 1694–1702. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.11.50172.93-20>
- Putilin A.N., Morozov A.V., Kopenkin S.S., et al. Holographic waveguide periscopes in augmented reality displays // *Opt. and Spectrosc.* 2020. V. 128. № 11. P. 1828–1836. <https://doi.org/10.1134/s0030400x2011020x>
- Maimone A., Georgiou A., Kollin J.S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality // *ACM Transactions on Graphics (TOG).* 2017. V. 36. № 4. P. 1–16. <http://dx.doi.org/10.1145/3072959.3073624>
- Jang C., Bang K., Li G., et al. Holographic near-eye display with expanded eye-box // *ACM Trans. on Graphics (TOG).* 2018. V. 37. № 6. P. 1–14. <https://doi.org/10.1145/3272127.3275069>
- Shin B., Kim S., Druzhin V., et al. Compact augmented-reality glasses using holographic optical element combiner // *Practical Holography XXXIII: Displays, Materials, and Applications.* 2019. V. 10944. P. 93–99. <http://doi.org/10.1117/12.2507339>
- Путилин Н.А., Дубынин С.Е., Путилин А.Н. и др. Искажения записи и воспроизведения внеосевых

- голограммных фокусирующих зеркал в схемах дисплеев дополненной реальности // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 8. С. 29–43. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-08-29-43>
- Putilin N.A., Dubynin S.E., Putilin A.N., et al. Recording and reconstruction distortion of off-axis hologram focusing mirror in augmented reality displays // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. № 8.
13. Wang J., Zhou Q., Chen J., et al. Design of a see-through off-axis head-mounted-display optical system with an ellipsoidal surface // Current Optics and Photonics. 2018. V. 2. № 3. P. 280–285. <http://doi.org/10.3807/COPP.2018.2.3.280>
  14. 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. <http://doi.org/10.1117/12.254477>
  15. Kress B.C., Chatterjee I. Waveguide combiners for mixed reality headsets: A nanophotonics design perspective // Nanophotonics. 2020. V. 10. № 1. P. 41–74. <http://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0410>
  16. Solomashenko A., Kuznetsov A., Nikolaev V., et al. Development of a holographic waveguide with thermal compensation for augmented reality devices // Appl. Sci. 2022. V. 12. № 21. P. 11281. <http://doi.org/10.3390/app122111281>
  17. Vostrikov G.N., Muravyev N.V., Angervaks A.E., et al. Method for compensating aberrations of a virtual image formed by an augmented reality display based on a cylindrical diffractive waveguide // App. Sci. 2023. V. 13. № 4. P. 2400. <https://doi.org/10.3390/app13042400>
  18. Grant A.J. DigiLens: Design and fabrication considerations for holographic waveguide AR displays // SPIE AVR21 Industry Talks II. 2021. V. 11764. P. 117640M. <https://doi.org/10.1117/12.2597450>
  19. Kress B.C., Cummings W.J. Towards the ultimate mixed reality experience: HoloLens display architecture choices // SID Symp. Digest of Technical Papers. 2017. V. 48. P. 127–131. <https://doi.org/10.1002/sdtp.11586>
  20. Han J., Liu J., Yao X., et al. Portable waveguide display system with a large field of view by integrating freeform elements and volume holograms // Opt. Exp. 2015. V. 23. № 3. P. 3534–3549. <https://doi.org/10.1364/OE.23.003534>
  21. Можаров Г.А. Геометрическая оптика: уч. пособ. 2-е изд. СПб.: изд. «Лань», 2019. 708 с.  
Mozharov G.A. Geometric optics: Studies for universities [in Russian]. 2-nd ed. St. Petersburg: Publishing House "Lan", 2019. 708 p.
  22. Запрыгаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем: учеб. для вузов. М.: Логос, 2000. 584 с.  
Zapryagaeva L.A., Svshnikova I.S. Calculation and design of optical systems: Studies for universities [in Russian]. Moscow: "Logos" Publ., 2000. 584 p.
  23. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.  
Bobrov S.T., Greysukh G.I., Turkevich Yu.G. Optics of diffraction elements and systems [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1986. 223 p.
  24. Introduction to integrated optics / Ed. by Barnoski M. N.Y.: Plenum Press, 1974. 515 p.

## АВТОРЫ

**Николай Андреевич Путилин** — лаборант, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Россия; ведущий учебной лабораторией, Московский государственный университет геодезии и картографии, 125993, Москва, Россия; <http://orcid.org/0000-0001-5363-3176>, [nick.putilin.01@mail.ru](mailto:nick.putilin.01@mail.ru)

**Сергей Евгеньевич Дубынин** — высококвалифицированный младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Россия; <http://orcid.org/0000-0003-0452-5325>, [dubyninse@lebedev.ru](mailto:dubyninse@lebedev.ru)

**Андрей Николаевич Путилин** — кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Россия; доцент, Московский государственный университет геодезии и картографии, 125993, Москва, Россия; <http://orcid.org/0000-0003-0492-0974>, [putilinan@lebedev.ru](mailto:putilinan@lebedev.ru)

**Сергей Сергеевич Копенкин** — инженер 2-й категории, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Россия; инженер, МИРЭА — Российский технологический университет, 119454, Москва, Россия; <http://orcid.org/0000-0001-7572-4976>, [kopenkinss@yandex.ru](mailto:kopenkinss@yandex.ru)

**Юрий Петрович Бородин** — инженер 2-й категории, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Россия; инженер, МИРЭА — Российский технологический университет, 119454, Москва, Россия; старший преподаватель, Московский государственный университет геодезии и картографии, 125993, Москва, Россия; <http://orcid.org/0000-0003-3021-2058>, [yuri.borodin47@yandex.ru](mailto:yuri.borodin47@yandex.ru)

## AUTHORS

**Nikolay A. Putilin** — Laboratory Assistant, Lebedev Physical Institute of the RAS, 119991, Moscow, Russia; Head of the Educational laboratory, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 125993, Moscow, Russia; <http://orcid.org/0000-0001-5363-3176>, [nick.putilin.01@mail.ru](mailto:nick.putilin.01@mail.ru)

**Sergey E. Dubynin** — Highly Qualified Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the RAS, 119991, Moscow, Russia; <http://orcid.org/0000-0003-0452-5325>, [dubyninse@lebedev.ru](mailto:dubyninse@lebedev.ru)

**Andrey N. Putilin** — PhD (Physics and Mathematics), Highly Qualified Leading Researcher, Lebedev Physical Institute of the RAS, 119991, Moscow, Russia; Associate Professor, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 125993, Moscow, Russia; <http://orcid.org/0000-0003-0492-0974>, [putilinan@lebedev.ru](mailto:putilinan@lebedev.ru)

**Sergey S. Kopenkin** — Engineer, Lebedev Physical Institute of the RAS, 119991, Moscow, Russia; Engineer, MIREA, 119454, Moscow, Russia; <http://orcid.org/0000-0001-7572-4976>, [kopenkinss@yandex.ru](mailto:kopenkinss@yandex.ru)

**Yuriy P. Borodin** — Engineer, Lebedev Physical Institute of the RAS, 119991, Moscow, Russia; Engineer, MIREA, 119454, Moscow, Russia; Senior Lecturer, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 125993, Moscow, Russia; <http://orcid.org/0000-0003-3021-2058>, [yuri.borodin47@yandex.ru](mailto:yuri.borodin47@yandex.ru)