



Разработка оптических схем формирования комфортной визуальной обстановки в области тренажеростроения

П. С. Завьялов¹, Е. В. Власов¹, А. В. Солдатенко¹,
М. А. Завьялова¹, В. С. Бартош²

¹ Конструкторско-технологический институт научного
приборостроения СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
Новосибирск, Россия

В статье рассматриваются основные принципы, достоинства и недостатки формирователей изображения для устройств визуализации обстановки. Установлены требования к качеству формируемого изображения при работе с наблюдателем. Представлены два варианта построения проекционных оптических систем, обеспечивающих достаточно широкое поле зрения для неподвижного наблюдателя.

Ключевые слова: визуализация обстановки, виртуальные тренажеры, проекционные системы, угол поля зрения, дисторсия

Статья поступила: 12.08.2021

Статья принята: 08.09.2021

ВВЕДЕНИЕ

В технической и научной литературе представлено большое количество информации по устройствам визуализации обстановки, которые применяются в сфере развлечений, архитектурном и промышленном дизайне, тренажеростроении и других областях. В данной работе рассматривается более узкая задача визуализации информации в смотровых окнах или иллюминаторах. Такие устройства применяются, например, в тренажерах космических кораблей, подводных аппаратов, специ-

Development of Optical Schemes for Formation of a Comfortable Visual Simulation in The Field of Simulators Building

P. S. Zavyalov¹, E. V. Vlasov¹, A. V. Soldatenko¹,
M. A. Zavyalova¹, V. S. Bartosh²

¹ Technological Design Institute of Scientific Instrument
Engineering of the Siberian Branch of Russian Academy
of Sciences

² Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The article discusses the basic principles, advantages and disadvantages of imaging devices for visual simulation. The requirements for the quality of the generated image when working with an observer have been established. Two options for constructing projection optical systems are presented that provide a sufficiently wide field of view for a stationary observer.

Keywords: visual simulation, virtual simulators, projection systems, field of view, distortion

Received on: 12.08.2021

Accepted on: 08.09.2021

INTRODUCTION

The technical and scientific literature contains a large amount of information on visual simulation devices that are used in the field of entertainment, architectural and industrial design, simulators and other areas. In this paper, a narrower task of visualizing information in viewing windows or portholes is considered. Such devices are used, e.g., in simulators of spaceships, underwater vehicles, special vehicles, etc., where the position of the observer is very limited, on the other hand, it is impossible or prohibited to use visual simulation on the human head (special glasses, helmets, eyepieces, etc. etc.). These features limit the choice of designs

альных транспортных средств и т. п., где положение наблюдателя весьма ограничено, с другой стороны, нет возможности или запрещено использовать устройства визуализации на голове человека (специальные очки, шлемы, окуляры и т. д.). Эти особенности ограничивают выбор конструкций и оптической схемы устройств визуализации. Одним из критически важных параметров для устройства формирования изображения является размер поля зрения. Чем шире оно будет, тем больший «эффект присутствия» будет формироваться в тренажере.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

По принципу построения оптической схемы можно выделить следующие две группы методов: экранные, где между наблюдателем и источником изображения нет никакой оптической схемы, и проекционные, в которых в формировании визуальной обстановки для наблюдателя используются элементы, обладающие оптической силой (зеркала, линзы).

Экранные методы можно разделить по источнику изображения, которым может быть либо светорассеивающий или просветный экран, освещаемый проектором, либо один или несколько дисплеев (мониторов).

Для имитации визуальной обстановки с широким полем зрения (вплоть до 360°) используют экраны различной формы (плоские, сферические, тороидальные), которые освещаются несколькими LCD- или DLP-проекторами. При этом поля проекторов приходится достаточно точно калибровать [1] для минимизации эффектов, наблюдаемых в области перекрывающихся зон.

При использовании дисплеев также можно получать достаточно большие поля зрения, совмещая их друг с другом. Однако в силу конструктивных особенностей – наличия рамки у большинства дисплеев – на формируемой картине будут видны стыки.

Все перечисленные экранные методы обладают определенными недостатками. Во-первых, визуальная обстановка создается на определенном ограниченном расстоянии. Это не дает задействовать стимулы аккомодации глаза. Оператор видит, что картина находится где-то вблизи. Поэтому при синтезе дальней зоны стараются располагать экраны по возможности дальше от оператора (от 2 до 10 м), где этот визуальный дискомфорт уже не ощущается. Во-вторых, при близком расположении экрана/дисплея не будет наблюдаться

and optical design of imaging devices. One of the critical parameters for an imaging device is the size of the field of view. The wider it is, the greater the «presence effect» will be formed in the simulator.

BASIC PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF IMAGING DEVICES

According to the principle of constructing an optical scheme, the following two groups of methods can be distinguished: screen methods, where there is no optical scheme between the observer and the image source, and projection methods, in which elements with optical power (mirrors, lenses) are used in the formation of a visual simulation for the observer.

Screen methods can be classified according to the source of the image, which can be either a light-scattering or translucent screen illuminated by a projector, or one or more displays (monitors).

To simulate a visual simulation with a wide field of view (up to 360°), screens of various shapes (flat, spherical, toroidal) are used, which are illuminated by several LCD or DLP projectors. In this case, the fields of the projectors have to be sufficiently accurately calibrated [1] to minimize the effects observed in the area of overlapping zones.

When using displays, it is also possible to obtain sufficiently large fields of view by combining them with each other. However, due to the design features – the presence of a frame in most displays – joints will be visible in the formed picture.

All of the above screen methods have certain disadvantages. First, the visual simulation is created at a certain limited distance. This prevents the stimuli of the eye accommodation from being activated. The operator sees that the picture is somewhere close. Therefore, when synthesizing the far zone, they try to place the screens as far as possible from the operator (from 2 to 10 m), where this visual discomfort is no longer felt. Secondly, when the screen/display is located close, the parallax effect will not be observed, when, when the observer's head is displaced, errors will occur in determining the spatial location of close and distant objects. In some cases, such a situation can be quite critical, since the trainees have a wrong idea of how to drive a vehicle. In some situations, this can lead to serious consequences. On-screen methods are widely used in flight simulators, where the entire synthesized environment is usually located in the far zone (at infinity), and the observer's ability to move is severely limited by a cramped cockpit [2-8].

In projection methods, an optical system is installed between the image source (screen, display, slide, template, etc.), which creates, as a rule,

эффект параллакса, когда при смещении головы наблюдателя будут возникать ошибки в определении пространственного расположения близко и далеко расположенных предметов. В ряде случаев такая ситуация может быть достаточно критичной, поскольку у обучаемых создается неверное представление об управлении транспортным средством. В ряде ситуаций это может приводить к серьезным последствиям. Экранные методы находят широкое применение в авиатренажерах, где вся синтезируемая обстановка обычно находится в дальней зоне (на бесконечности), а возможности перемещения наблюдателя сильно ограничены тесной кабиной [2-8].

В проекционных методах между источником изображения (экраном, дисплеем, слайдом, шаблоном и т.п.) устанавливается оптическая система, которая создает, как правило, мнимое изображение на конечном или бесконечном расстоянии от оператора [9-11]. При этом в таких системах существует возможность изменения видимой дальности до синтезируемой картины путем изменения расстояния между оптической системой и источником изображения. Также есть возможность создания нескольких планов (ближнего и дальнего) путем комбинирования с помощью призм и полупрозрачных зеркал нескольких источников изображения. В качестве основного оптического элемента для коллимации излучения в тренажерной технике широко используются вогнутые зеркала (как правило, сферической формы). Источник изображения при этом размещают в фокусе сферического зеркала: $F=R/2$. Основная проблема при использовании такого варианта состоит в том, что источник изображения при этом находится между зеркалом и наблюдателем (рис. 1а). Для широкоугольных схем (поле зрения больше 30°) это представляет существенную проблему, поэтому здесь используют два пути: либо проецируют в эту

a virtual image at a finite or infinite distance from the operator [9-11]. Moreover, in such systems, it is possible to change the apparent range to the synthesized pattern by changing the distance between the optical system and the image source. It is also possible to create several plans (near and far) by combining several image sources using prisms and semitransparent mirrors. Concave mirrors (usually of a spherical shape) are widely used as the main optical element for collimation of radiation in simulation equipment. In this case, the image source is placed in the focus of the spherical mirror: $F = R/2$. The main problem when using this option is that the image source is in this case between the mirror and the observer (Fig. 1a). For wide-angle schemes (the field of view is more than 30°), this presents a significant problem; therefore, two ways are used here: either an intermediate image is projected into this area through a semitransparent mirror (Fig. 1b), or an off-axis optical scheme is made (Fig. 1c).

This option for constructing a projection optical system can provide a fairly wide field of view (within $30^\circ - 60^\circ$). When a toroidal mirror is used instead of a spherical mirror, in the focus of which a toroidal transmission screen is also installed, a wide panoramic view of up to 180° can be achieved, but the same $30^\circ - 60^\circ$ will be at the other coordinate [9-11].

Instead of a mirror optical scheme, lens optical schemes are also used. In this case, if the screen is installed in the focal plane of some lens, the observer sees an object infinitely distant from him. In this case, the field of view can reach rather large values (up to $90^\circ - 120^\circ$). But at the same time, the diameters of the optical elements also increase.

With high requirements for image quality to correct aberrations, it is necessary to use multilens optical circuits made of different types of glasses. Therefore, lens schemes are more often used for monocular observation. This circumstance explains the fact

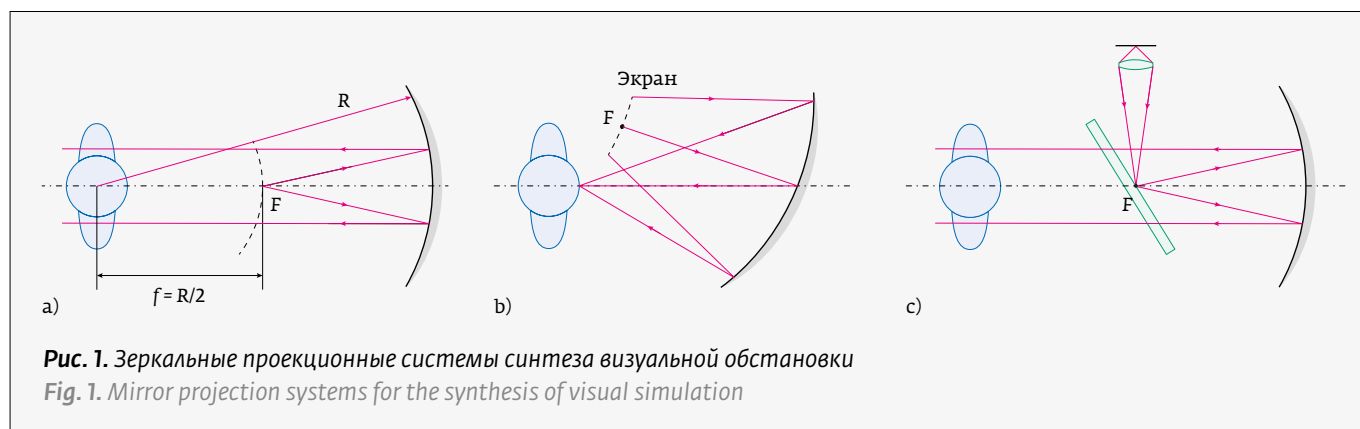


Рис. 1. Зеркальные проекционные системы синтеза визуальной обстановки
Fig. 1. Mirror projection systems for the synthesis of visual simulation

область промежуточное изображение через полупрозрачное зеркало (рис. 1b), либо делают внеосевую оптическую схему (рис. 1c).

Такой вариант построения проекционной оптической системы может обеспечить достаточно широкое поле зрения (в пределах 30–60°). При использовании вместо сферического зеркала тороидального, в фокусе которого установлен также тороидальный просветный экран, можно достичь широкого панорамного обзора до 180°, но по другой координате будут те же 30–60° [9–11].

Вместо зеркальной оптической схемы также используются и линзовые оптические схемы. В этом случае, если экран устанавливается в фокальной плоскости некоторого объектива, наблюдатель видит бесконечно удаленный от него объект. Поле зрения может достигать при этом достаточно больших величин (до 90–120°). Но при этом и увеличиваются диаметры оптических элементов.

При высоких требованиях к качеству изображения для исправления aberrаций требуется использовать многолинзовые оптические схемы из разных марок стекол. Поэтому линзовые схемы чаще применяют для монокулярного наблюдения. Этим обстоятельством объясняется тот факт, что наибольшее распространение получили зеркальные проекционные схемы, так как зеркала большого формата гораздо легче изготовить, а сами зеркала не вносят хроматических aberrаций. Но при этом, внеосевые широкоугольные зеркальные схемы вносят существенные искажения (астигматизм и кому). Поэтому при их использовании требуется анализировать качество формируемого изображения и находить баланс между величиной поля зрения и значениями aberrаций.

ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ФОРМИРУЕМОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Требования к качеству изображения весьма разнообразны и зависят от задачи, решаемой с помощью оптической системы. Полного исправления всех aberrаций нельзя получить даже в сколь угодно сложной системе. Поэтому остаточные aberrации допускаются, их величины определяются назначением системы и приемником изображения.

В телескопических системах (дальний предмет – дальнее изображение), работающих с глазом, хорошее качество изображения должно быть в центре поля, а на краю поля допускается ухудшение качества изображения, т.к. рассматриваемое изображение всегда можно привести в центр поля. Поскольку приемником изображения явля-

that the most widespread are mirror projection schemes, since large format mirrors are much easier to manufacture, and the mirrors themselves do not introduce chromatic aberrations. However, at the same time, off-axis wide-angle mirror schemes introduce significant distortions (astigmatism and coma). Therefore, when using them, it is required to analyze the quality of the formed image and find a balance between the magnitude of the field of view and the values of aberrations.

REQUIREMENTS FOR THE QUALITY OF THE GENERATED IMAGE

Requirements for image quality are very diverse and depend on the problem being solved with the help of the optical system. A complete correction of all aberrations cannot be obtained even in an arbitrarily complex system. Therefore, residual aberrations are allowed, their values are determined by the purpose of the system and the image receiver.

In telescopic systems (distant object – distant image), working with the eye, good image quality should be in the center of the field, and deterioration of the image quality is allowed at the edge of the field, since the image in question can always be brought to the center of the field. Since the eye is the image receiver, the allowable aberration values should be less than or commensurate with the eye resolution. Table shows the allowable telescope aberration values. The given values were obtained from long-term practical observations [12–15]. They are convenient to use when assessing the acceptable quality of systems working with an image receiver such as the eye.

When evaluating off-axis aberrations of telescopes and, consequently, eyepieces, the operating conditions must be taken into account. Thus, in binoculars and telescopes held in hands, a person, seeing the edges of the image field due to peripheral vision and noticing some movement there, turns his head along with the binoculars and transfers the «suspicious» area to the center. In such cases, the edges of the eyepiece image field are perceived by peripheral vision and may have large aberrations. In devices placed stationary, e.g., in tank panoramas, stereoscopic tubes, etc., transferring the extreme zones of the image field to the center takes a significant amount of time, so the observer is forced to consider the edges of the image field by turning his eye.

In photographic lenses (distant object – near image), the requirements for image quality are very diverse and largely depend on the operating spectral range, the image receiver and the purpose of the system. Image quality requirements may include: resolution



ется глаз, то допустимые значения aberrаций должны быть меньше или соизмеримы с разрешающей способностью глаза. В таблице приведены допустимые значения aberrаций зрительных труб. Приводимые значения получены из многолетних практических наблюдений [12-15]. ими удобно пользоваться при оценке допустимого качества систем, работающих с таким приемником изображения как глаз.

При оценке внеосевых aberrаций зрительных труб и соответственно окуляров, нужно учитывать условия работы. Так, в биноклях и зрительных трубах, удерживаемых в руках, человек, видя края поля изображения за счет периферийного зрения и отметив там некоторое движение, поворачивает голову вместе с биноклем и переводит «подозрительный» участок в центр. В таких случаях края поля изображения окуляра воспринимаются периферическим зрением и могут обладать большими aberrациями. В приборах, размещаемых стационарно, например в танковых панорамах, стереотрубах и т. п., перевод крайних зон поля изображения в центр занимает существенное время,

in lines/mm in the center of the field and at the edge, frequency-contrast characteristic (FCC) with an indication of the frequency and the required contrast. In infrared systems, the diameter of the scattering circle with a given concentration of energy in it can be set.

In projection systems (near subject - near image), if they are calculated in the reverse path of the rays, the requirements for image quality are approximately the same as in photographic systems.

The image quality in the plane of the screen can be estimated by the angle at which the observer sees the scattering circle. If the angle is $1' - 2'$, then the image quality can be considered satisfactory.

Thus, from the above requirements for visual devices, it can be seen that the main criterion for the quality of an optical system that forms a visual simulation is the resolution over the entire field of view, which should reach the resolution limit of the human eye $1' - 2'$. In this case, for the imager, as a stationary system, it is impossible to impose different requirements for the resolution at the edge and in the center of the field of view. The resolution across the entire field should tend to $2'$.

Допустимые значения aberrаций визуальных приборов

Acceptable values of aberrations of visual devices

Наименование aberrаций Aberration name	Качество изображения Image quality		
	Удовлетворительное Satisfactory	Хорошее Good	Отличное Excellent
Точка на оси Point on axis			
Сферическая aberrация Spherical aberration I. В угловой мере in angular measure: на краю зрачка at the edge of the pupil на зоне зрачка on the pupil area II. В диоптрийной мере in diopter measure: на краю зрачка at the edge of the pupil на зоне зрачка on the pupil area	<2' <1' >0,25 >0,1	<1' <30'' <0,25 <0,1	<20'' <10'' <0,1 <0,05
Хроматизм положения, мин. Position chromatism, min.	<8'	<6'	<3'
Точка вне оси Point out of axis			
Астигматизм, дптр Astigmatism, diopters	8	2	1,5
Кривизна поля, дптр : Curvature of the field, diopters: в меридион. сечении to the meridional cross section в сагитт. сечении in sagittal cross section	> -6 < -2	> -3 > -1	> -2 > -0,1
Дисторсия, % Distortion,% для поля 50° for a field of 50° для поля 50° for a field of 50°	6 9	3 5	2 4
Хроматизм увеличения на краю поля, мин Increase chromatism at the edge of the field, min	<8'	<5'	<3'

поэтому наблюдатель вынужден рассматривать края поля изображения, поворачивая глаз.

В фотообъективах (дальний предмет – ближнее изображение) требования к качеству изображения очень разнообразны и во многом зависят от рабочего спектрального диапазона, приемника изображения и назначения системы. В качестве требований к качеству изображения могут выступать: разрешающая способность в лин./мм в центре поля и на краю, частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) с указанием частоты и требуемого контраста. В инфракрасных системах может задаваться диаметр кружка рассеяния с заданной концентрацией энергии в нем.

В проекционных системах (ближний предмет – ближнее изображение), если они рассчитываются в обратном ходе лучей, требования к качеству изображения приблизительно такие же, что и в фотографических системах.

Качество изображения в плоскости экрана можно оценить по углу, под которым наблюдатель видит кружок рассеяния. Если угол составляет 1-2', то качество изображения можно считать удовлетворительным.

Таким образом, из приведенных требований к визуальным приборам видно, что основным критерием качества оптической системы, формирующей визуальную обстановку, считается разрешение по всему полю зрения, которое должно достигать предела разрешающей способности человеческого глаза 1-2'. При этом для формирователя изображения как стационарной системы нельзя накладывать разные требования к разрешению на краю и в центре поля зрения. Разрешение по всему полю должно стремиться к 2'.

Дисторсия для визуальных приборов обычно ограничивается значением 2-5%, при которых человек не замечает существенных геометрических искажений. Для представленных выше вариантов оптических схем систем синтеза визуальной обстановки обычно дисторсия значительно превышает указанный порог. В этом случае необходимо компенсировать дисторсионные искажения путем формирования соответствующей цифровой визуальной модели.

ЗЕРКАЛЬНАЯ ПРОЕКЦИОННАЯ СИСТЕМА

В качестве первого варианта формирования изображения рассматривалась оптическая схема с внеосевым расположением экрана, показанная на рис. 1в. В ней в качестве основного элемента используется наклонное вогнутое сферическое зеркало, в фокальную область которого установлен

Distortion for visual devices is usually limited to 2-5%, at which a person does not notice significant geometric distortions. For the above variants of optical schemes of systems for synthesizing a visual simulation, the distortion usually significantly exceeds the specified threshold. In this case, it is necessary to compensate for distortion distortions by forming an appropriate digital visual model.

MIRROR PROJECTION SYSTEM

As the first variant of image formation, an optical scheme with an off-axis screen arrangement was considered, shown in Fig. 1c. There, an inclined concave spherical mirror is used as the main element, in the focal region of which a transmissive spherical screen is installed. An LCD or DLP projector is used as the image source. In this case, it is necessary to use a lens for the projector, which allows you to build an image of a small size (~ 0.5 m).

When calculating such an optical scheme, dimensional restrictions on the location of all optical elements are of decisive importance. As a result, in the software package for calculating optical systems Zemax Optical Studio [16], a variant of the scheme was obtained, shown in Fig. 2.

The obtained main characteristics of the optical scheme: the diameter of the illuminator is 250 mm, the angle of the field of view: $\pm 26^\circ$, the overall size of the large spherical mirror $\varnothing 1100$ mm, the radius of curvature of the spherical mirror $R = 1400$ mm, the overall size of the transmissive screen $\varnothing 480$ mm, the distortion: 18.5% (asymmetric). The image quality in this optical scheme is determined exclusively by the spherical mirror. There are no chromatic aberrations. The decisive role for resolution is played by astigmatism, which increases with an increase in the angle of incidence of the rays on the surface of the mirror. Therefore, when calculating this option, it is necessary to reduce this angle. The scattering spots of the calculated mirror projection system are shown in Fig. 3.

It should be noted that in this variant there is no strong dependence on the displacement of the observer's eye. When the observer is displaced to the side relative to the optical axis, the resolution deteriorates slightly (see Fig. 4).

It can be seen from Fig. 4 that this optical scheme has a rather low resolution (2'-7'), which also strongly depends on the direction of view. The edge of the mirror farthest from the porthole will appear blurred. The type of distortion is shown in Fig. 5.

The main advantages of such an imaging device are the relative simplicity of the design and the possibility

просветный сферический экран. В качестве источника изображения используется LCD- или DLP-проектор. При этом необходимо использовать для проектора объектив, который позволяет строить изображение небольшого размера (~0,5 м).

При расчете подобной оптической схемы определяющее значение имеют габаритные ограничения по расположению всех оптических элементов. В результате в программном пакете для расчета оптических систем Zemax Optical Studio [16] был получен вариант схемы, представленный на рис. 2.

Полученные основные характеристики оптической схемы: диаметр иллюминатора 250 мм, угол поля зрения: $\pm 26^\circ$, габаритный размер большого сферического зеркала $\phi 1100$ мм, радиус кривизны сферического зеркала $R=1400$ мм, габаритный размер просветного экрана $\phi 480$ мм, дисторсия: 18,5% (несимметричная). Качество изображения в этой оптической схеме определяется исключительно сферическим зеркалом. Хроматические aberrации отсутствуют. Определяющую роль для разрешения играет астигматизм, увеличивающийся с ростом

of synthesizing the visual simulation at a distance from 2 m to ∞ . At the same time, the following disadvantages should be noted: limited field of view (up to $\pm 26^\circ$), general asymmetry of the picture in terms of quality, astigmatism at one of the edges leads to a drop in resolution (up to 6' - 8'), large asymmetric distortion (18.5%).

LENS PROJECTION SYSTEM

A lens optical scheme was considered as an implementation of the imaging device. In this case, a lens assembly is installed in front of the illuminator, in the focus of which is a light-scattering screen illuminated by one or more projectors.

When calculating this optical scheme, the characteristics of the lens objective are of decisive importance for the image quality. To minimize chromatism, at least two grades of glass should be used.

This version of the optical scheme was calculated using the Zemax Optical Studio software package [16]. As the main optimization criterion, the minimum of the geometric circle of scattering for the observer behind the window was used. Also, additional criteria

were the maximum value of the field of view, the dimensions and mass of the optical elements, and the magnitude of the distortion.

As a result of the calculation, a variant of the optical scheme was obtained, shown in Fig. 6.

The following main characteristics of the optical scheme were obtained: field of view angle $\pm 50^\circ$, overall size of the projection screen $\phi 5$ m, distance to the screen 2.7 m, radius of curvature of the projection screen $\phi 12$ m, size of the largest lens 320 mm, number of lenses 2 pcs, brand glasses: LAK33, SF15 (Schott catalog), distortion no more than 22% (symmetrical). The image quality for the eye located on the optical axis can be considered almost ideal. Geometric distortion and chromatic aberration are much less than the diffraction limit (scattering point diagrams are shown in Fig. 7a). When the observer's eye is displaced, some deterioration in image quality occurs due to the chromatism of magnification (see Fig. 7b).

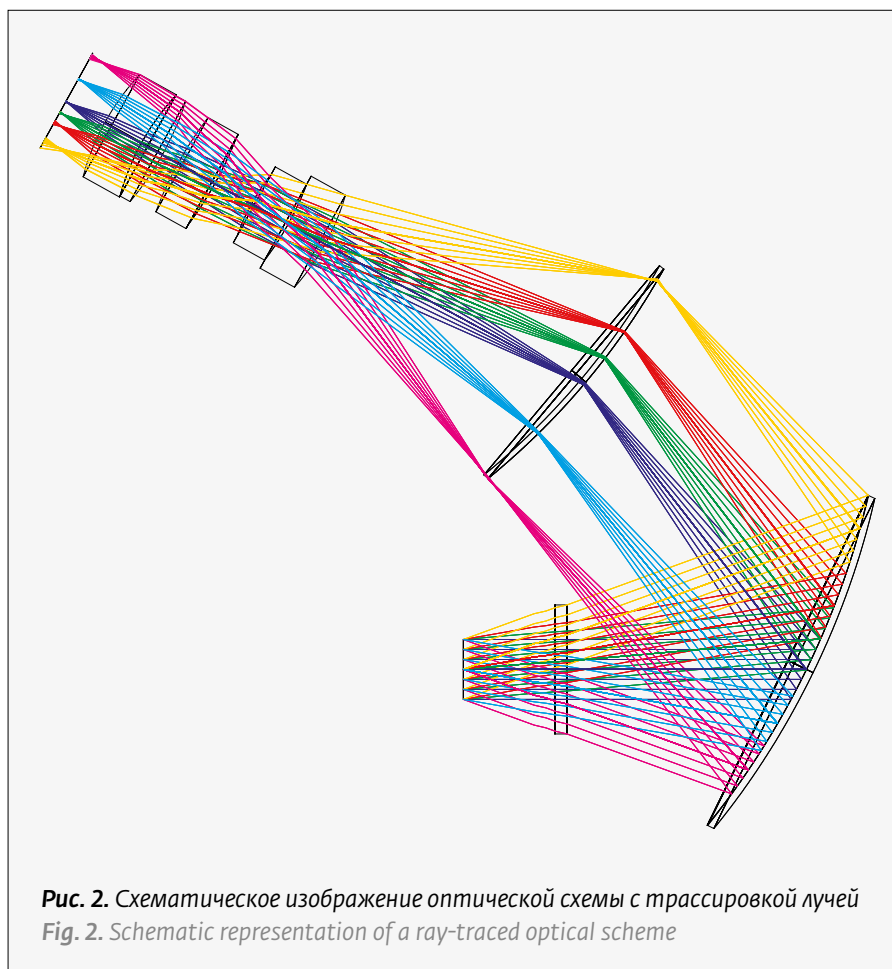


Рис. 2. Схематическое изображение оптической схемы с трассировкой лучей
Fig. 2. Schematic representation of a ray-traced optical scheme

угла падения лучей на поверхность зеркала. Поэтому при расчете данного варианта необходимо уменьшать этот угол. Пятна рассеяния рассчитанной зеркальной проекционной системы приведены на рис. 3.

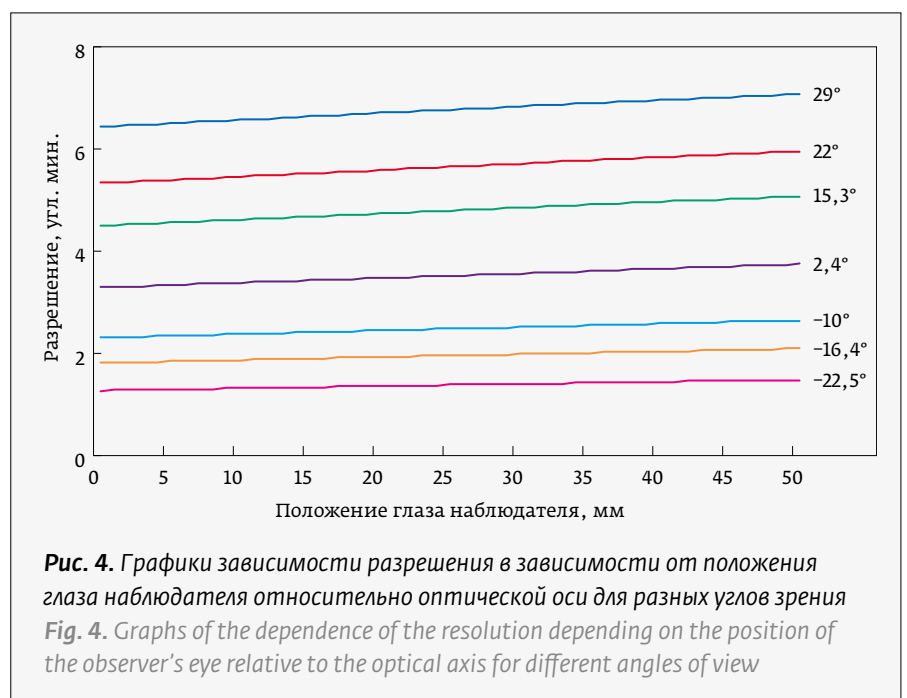
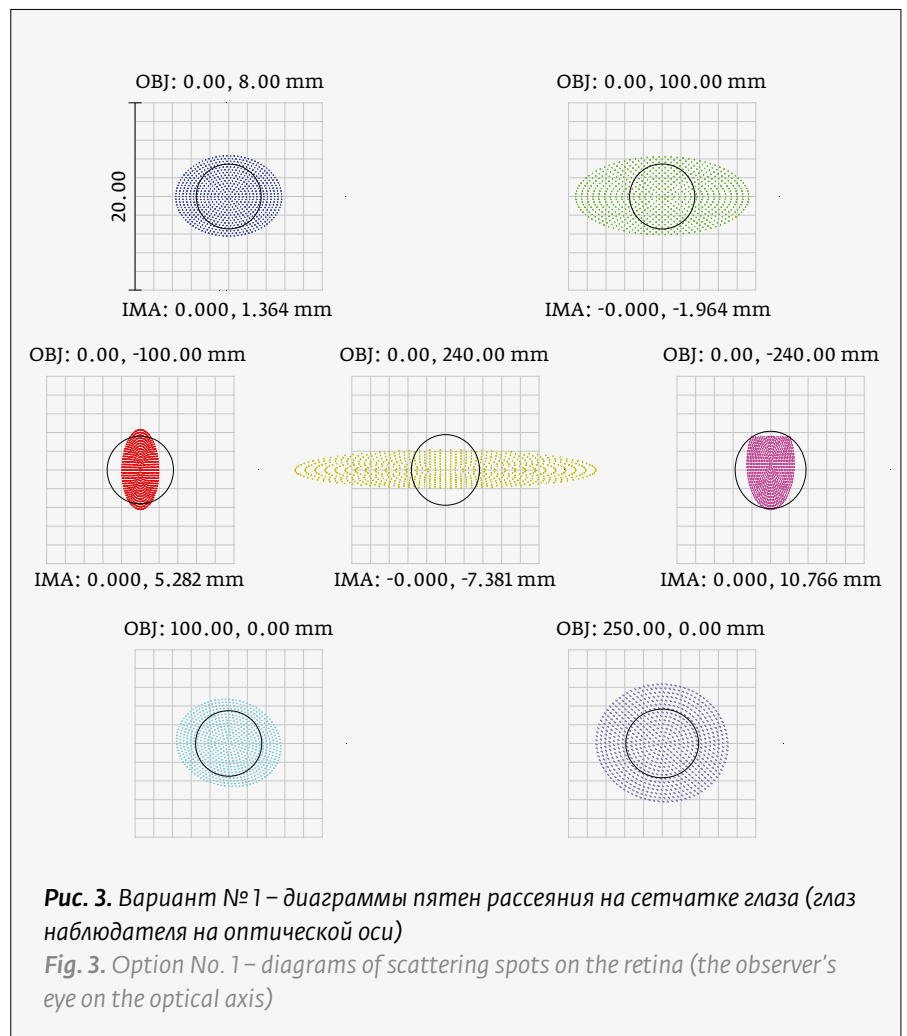
Необходимо отметить, что в этом варианте отсутствует сильная зависимость от смещения глаза наблюдателя. При смещении наблюдателя в сторону относительно оптической оси разрешение ухудшается незначительно (см. рис. 4).

Из рис. 4 видно, что данная оптическая схема обладает достаточно низким разрешением (2-7'), которое также сильно зависит от направления взгляда. Дальний от иллюминатора край зеркала будет выглядеть размытым. Вид дисторсионных искажений представлен на рис. 5.

Основными достоинствами такого формирователя изображения являются относительная простота конструкции и возможность синтеза визуальной обстановки на расстоянии от 2 м до ∞ . При этом необходимо отметить следующие недостатки: ограниченное поле зрения (до $\pm 26^\circ$), общая несимметричность картины по качеству, астигматизм на одном из краев приводит к падению разрешения (до 6-8'), большая несимметричная дисторсия (18,5%).

ЛИНЗОВАЯ ПРОЕКЦИОННАЯ СИСТЕМА

В качестве реализации формирователя изображения рассматривалась линзовая оптическая схема. В этом случае перед иллюминатором устанавливается линзовая сборка, в фокусе которой располагается светорассеивающий экран, освещаемый одним или несколькими проекторами.



При расчете данной оптической схемы определяющее значение для качества изображения имеют характеристики линзового объектива. Для минимизации хроматизма необходимо использовать как минимум две марки стекол.

Данный вариант оптической схемы был рассчитан в программном пакете Zemax Optical Studio [16]. В качестве основного критерия оптимизации использовался минимум геометрического кружка рассеяния для наблюдателя за иллюминатором. Также дополнительными критериями были максимальная величина поля зрения, габариты и масса оптических элементов, величина дисторсии.

В результате расчета был получен вариант оптической схемы, представленный на рис. 6.

Получены следующие основные характеристики оптической схемы: угол поля зрения $\pm 50^\circ$, габаритный размер проекционного экрана $\varnothing 5$ м, расстояние до экрана 2,7 м, радиус кривизны проекционного экрана $\varnothing 12$ м, размер наибольшей линзы 320 мм, количество линз 2 шт, марки стекол: LAK33, SF15 (каталог Schott), дисторсия не более 22% (симметричная). Качество изображения для глаза, расположенного на оптической оси, можно считать практически идеальным. Геометрические искажения и хроматические aberrации намного меньше

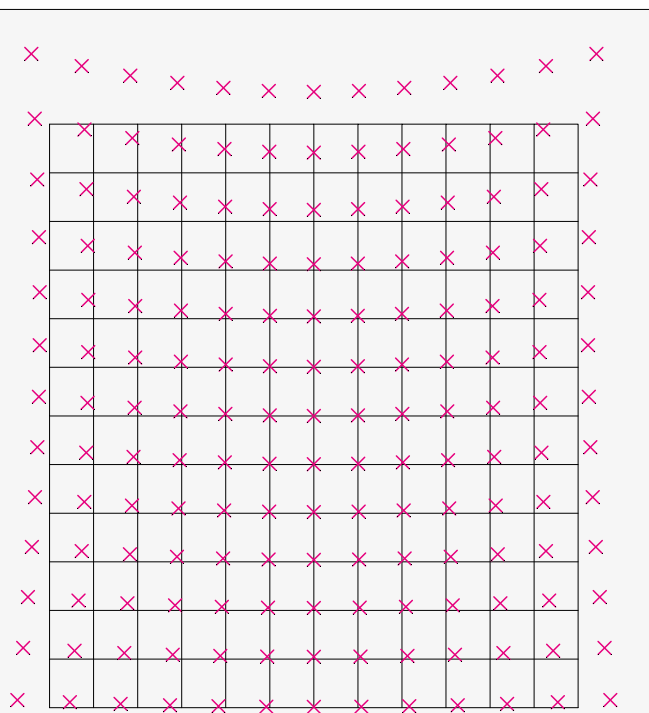


Рис. 5. Сетка дисторсии (максимальное значение дисторсии +18,4%)

Fig. 5. Distortion grid (maximum distortion value +18.4%)

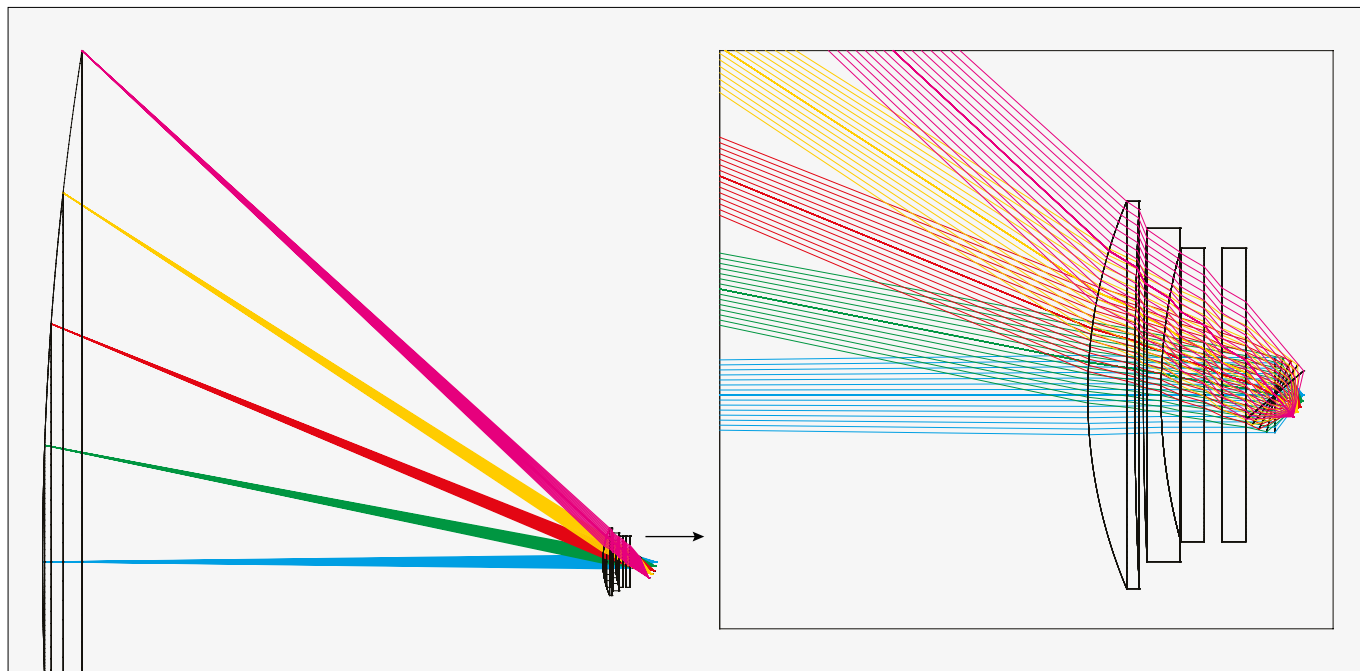


Рис. 6. Линзовая проекционная система с ходом лучей (диаметр иллюминатора 250 мм)

Fig. 6. Lens projection system with beam path (window diameter 250 mm)

дифракционного предела (диаграммы точек рассеяния приведены на рис. 7а). При смещении глаза наблюдателя происходит некоторое ухудшение качества изображения за счет хроматизма увеличения (см. рис. 7б).

Так как этот вариант оптической схемы имеет большой запас по качеству изображения, то при необходимости можно отказаться от использования сферического экрана ввиду сложности изготовления и использовать плоский. В этом случае разрешение снизится всего на 17%. Также разрешение изображения можно улучшить на 22% за счет применения асферической поверхности на первой линзе.

Для иллюстрации качества формируемой картины были рассчитаны серии графиков, представленных на рис. 8 и показывающих зависимость разрешения от смещения глаза наблюдателя ($R_{гл}$) для разных углов зрения (α). Графики кривизны поля и дисторсии приведены на рис. 9. Из рисунка 8 видно, что данная оптическая схема обладает хорошими характеристиками по разрешению (1-4') при большом поле зрения (до 100°). Для оптимального использования возможностей оптической системы при таком соотношении разрешения и поля зрения необходимо использовать как минимум про-

Since this version of the optical scheme has a large margin of image quality, if necessary, you can abandon the use of a spherical screen, due to the complexity of manufacturing, and use a flat one. In this case, the resolution will decrease by only 17%. In addition, the image resolution can be improved by 22% by using an aspherical surface on the first lens.

To illustrate the quality of the formed picture, a series of graphs were calculated, shown in Fig. 8 and showing the dependence of the resolution on the displacement of the observer's eye (R_{hl}) for different angles of view (α). The graphs of field curvature and distortion are shown in Fig. 9. Figure 8 shows that this optical scheme has good resolution characteristics (from 1' to 4') with a large field of view (up to 100°). For optimal use of the capabilities of the optical system with this ratio of resolution and field of view, it is necessary to use at least a projector with a resolution of 8K UltraHD (7680 × 4320), which will allow synthesizing a visual simulation with a resolution of 0.8' - 1.4'. When using two projectors with 4K UltraHD (3840 × 2160) resolution, the resolution will be in the order of 1.4' - 1.6'.



ООО «Лазерные компоненты» – российский поставщик комплектующих к оптоэлектронному, лазерному, тепловизионному и навигационному оборудованию, а также готовых решений для построения комплексных систем безопасности.

XXV МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА



СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА

НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ И МЭМС КОМПОНЕНТАХ

- Инclinометры
- Электронные компасы
- Системы определения курса и пространственного положения
- Инерциальные измерительные блоки
- Волоконно-оптические гироскопы
- Интегрированные навигационные системы



СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ОХРАНЫ

- Приборы ночного видения
- Радары
- Лидары
- Камеры ультрафиолетового диапазона
- Электромеханические телескопические мачты



ИНФРАКРАСНАЯ ТЕХНИКА

- Камеры SWIR, LWIR, MWIR
- CMOS модули с расширенным спектральным диапазоном
- ИК объективы



ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ

- Тепловизоры для измерения температуры тела человека
- Тепловизоры для поиска утечек газа
- Промышленные термографические тепловизионные камеры



Международная выставка «Интерполитех-2021»
19-22 октября 2021 г.
МВЦ «Крокус-Экспо», стенд 8D5-1

Россия, г.Москва, Варшавское шоссе, д.1 стр 17
expo@lasercomponents.ru www.lasercomponents.ru
+7 (495) 845-12-10

ектор с разрешением 8K UltraHD (7680×4320), что позволит синтезировать визуальную обстановку с разрешением в 0,8-1,4'. При использовании двух проекторов с разрешением 4K UltraHD (3840×2160) разрешение будет порядка 1,4-1,6'.

При реализации данной схемы существует возможность формирования визуальной обстановки на расстоянии от 2 м до ∞; обеспечение максимального угла обзора (100°), близкого к зрению человека (130-160°); получения высокого разрешения по всему полю зрения (1-3'), близкого к разрешению глаза человека. Так же отмечается меньшая по сравнению с первой схемой чувствительность к смещению головы наблюдателя. К недостаткам можно отнести большую симметричную дисторсию (22%), которую возможно минимизировать программным образом, и большие общие габариты стенда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены основные принципы, достоинства и недостатки формирователей изображения для устройств визуализации обстановки в смотровых окнах или иллюминаторах. Представлены основные требования к качеству формируемого изображения при работе с наблюдателем. Приведены два варианта построения проекционных оптических систем, обеспечивающих достаточно широкое поле зрения. В первом варианте используется вогнутое сферическое зеркало в фокусе которого установлен просветный сферический экран. Данный вариант достаточно прост в реализации, но показано, что имеются определенные недостатки: ограниченное поле зрения (до ±26°) и общая несимметричность картины по качеству изображения. Во втором линзовом варианте достигается существенно лучшие характеристики по качеству изображения при большем поле зрения (до ±50°).

When implementing this scheme, it is possible to form a visual simulation at a distance from 2 m to ∞; provide the maximum viewing angle (100°), close to human vision (130° - 160°); have a high resolution over the entire field of view (1' - 3'), close to the resolution of the human eye. There is also a lower sensitivity to displacement of the observer's head compared to the first scheme. The disadvantages include large symmetric distortion (22%), which can be minimized by software, and large overall dimensions of the stand.

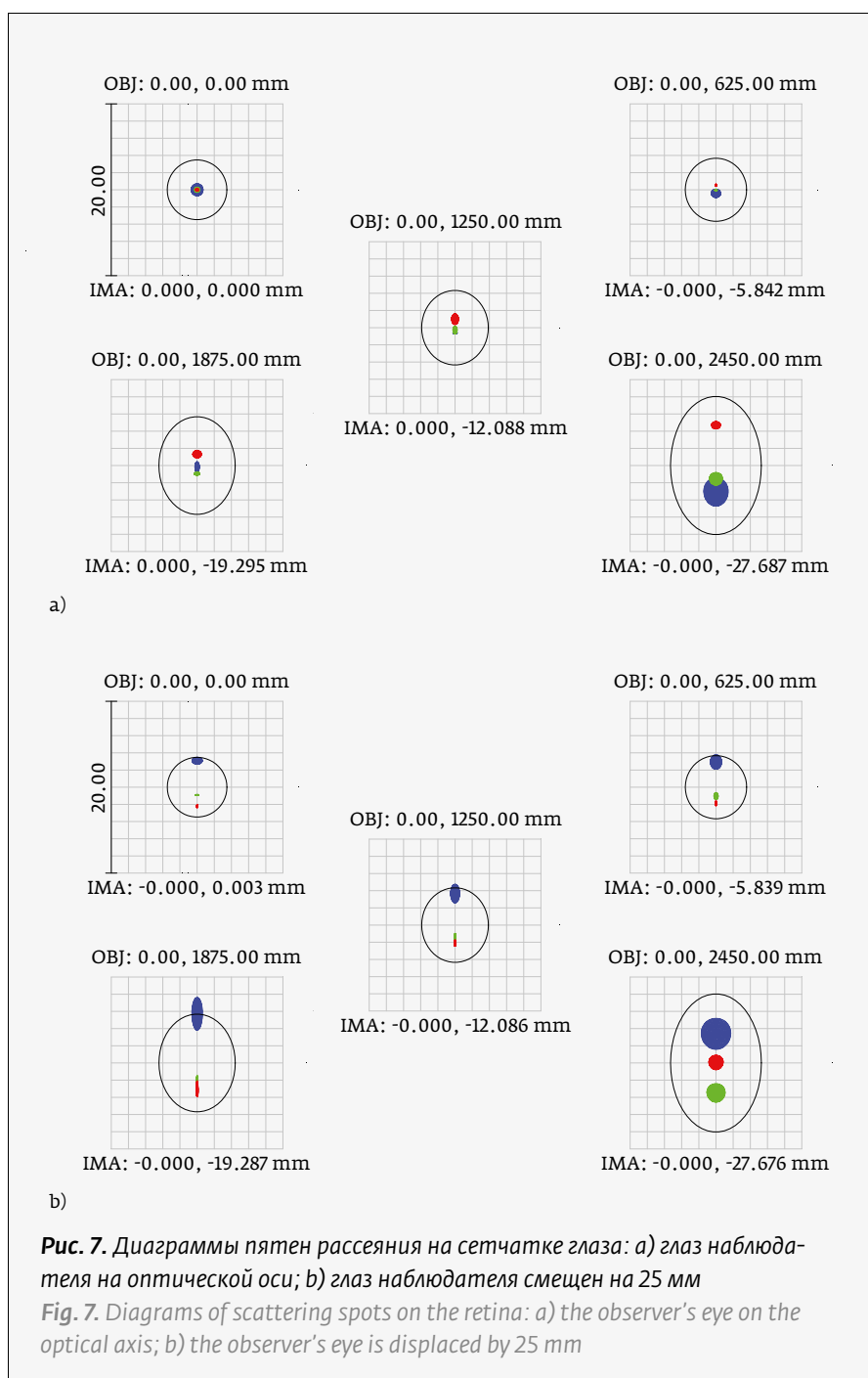


Рис. 7. Диаграммы пятен рассеяния на сетчатке глаза: а) глаз наблюдателя на оптической оси; б) глаз наблюдателя смещен на 25 мм
 Fig. 7. Diagrams of scattering spots on the retina: a) the observer's eye on the optical axis; b) the observer's eye is displaced by 25 mm



INTERPOLITEX



ЮБИЛЕЙНАЯ
XXV МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА СРЕДСТВ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА



19–22 ОКТЯБРЯ 2021, МОСКВА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»

О выставке

Форум

Программа

Заявка

Проект ОВК «БИЗОН»

Официальный партнер
по организации Форума
«Интерполитех: цифровая
трансформация
безопасности государства»



При поддержке



Минцифры
России

СВЯЗИСТ

ФГБУ «Связист» Минцифры
России

WWW.INTERPOLITEX.RU/MAIN

Полученные результаты могут быть использованы в современной тренажерной технике, поскольку позволяют создавать устройства синтеза визуальной обстановки, формирующие окружающую обстановку для глаз человека, достаточно близкую к естественной, что, несомненно, повышает визуальный комфорт при работе операторов.

REFERENCES

1. **Xizuo Liu, Yan Lin, Xiaogang Xu, Liang Ma.** Multi-Projector Calibration Based on Virtual Viewing Space. *International Journal of Virtual Reality*. 2019; 19(3): 16–30. DOI:10.20870/IJVR.2019.19.3.2918.
2. Teaching and Testing in Flight Simulation Training Devices (FSTD). https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/206904_EASA_EHEST_HE_10.pdf.
3. **Serikbaj A. T., Sholanov K. S.** Aviatrenazher na baze parallel'nogo manipulyatora. *Sbornik trudov Karagandinskogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020; 3(80): 135–137.
Серикбай А. Т., Шоланов К. С. Авиатренажер на базе параллельного манипулятора. *Сборник трудов Карагандинского технического университета*. 2020; 3(80): 135–137.
4. **Sparko A. L., Bürki-Cohen J., Go T. H.** Transfer of training from a full-flight simulator vs. A high level flight training device with a dynamic seat. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Canada*. 2010. DOI:10.2514/6.2010–8218.
5. **Zivan L., Tischler M. B.** Development of a full flight envelope helicopter simulation using system identification. *Journal of the American Helicopter Society*. 2010; 55(2): 0220031–0220315. DOI:10.4050/JAHS.55.022003.
6. **Schubert E., Lehmann O., Hüttig G.** Evaluation the influence of noise abatement procedures to pilot's workload and safety by using an airbus A330/340 full flight simulator. *International Congress on Noise Control Engineering. INTERNOISE*. 2005; 1: 582–591.
7. **Beechey R., Lagace G., Ruckel P., Nigus S., Sammur, N.** Development of the AH-1Z full flight simulator for the us marine corps. *Annual Forum Proceedings – AHS International. USA*. 2011; 2: 974–1001.
8. **Oberhauser M., Dreyer D., Convard T., Mamessier, S.** Rapid integration and evaluation of functional HMI components in a virtual reality aircraft cockpit. *Advances in Ergonomics in Design*. Springer. 2016; 17–24. DOI: 10.1007/978-3-319-41983-1_2.
9. **Mulligan R.** The Super Seasprite Simulator Visual – An Unwise Choice? URL: <http://www.simulationaustralasia.com/files/upload/pdf/research/24-10.pdf> (accessed:16.08.21).
10. **Joseph D., Burch T., Connolly R.** Comparison of Display System Options for Helicopter Aircrew Tactical Training Systems. *Interservice / Industry Training, Simulation and Education Conference. I/ITSEC 2002*; 1.
11. **Oberhauser M., Dreyer D., Mamessier S., Convard T., Bandow D., Hillebrand, A.** Bridging the gap between desktop research

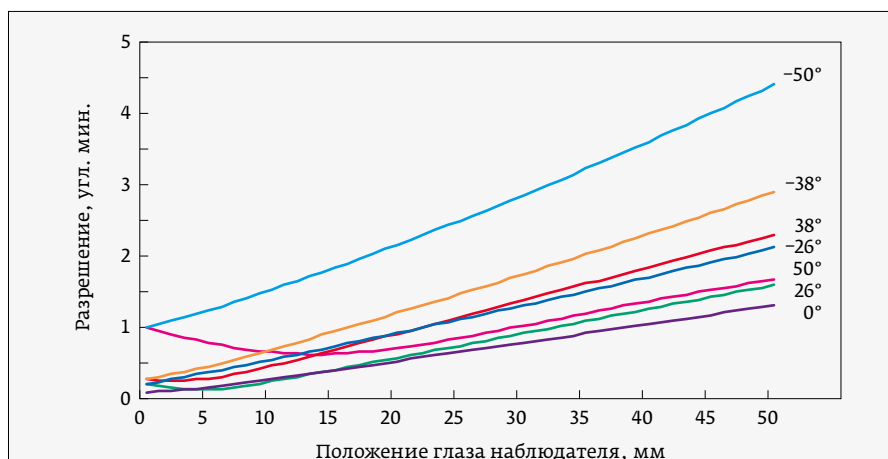


Рис. 8. Зависимость разрешения от смещения глаза наблюдателя ($R_{гд}$) для разных углов зрения (α)

Fig. 8. Dependence of the resolution on the displacement of the observer's eye (R_{eye}) for different angles of view (α)

CONCLUSION

The paper discusses the basic principles, advantages and disadvantages of imaging devices for visual simulation in viewing windows or portholes. The basic requirements for the quality of the generated image when working with an observer are presented. Two options for the construction of projection optical systems providing a sufficiently wide field of view are presented. In the first version, a concave spherical mirror is used in the focus of which a translucent

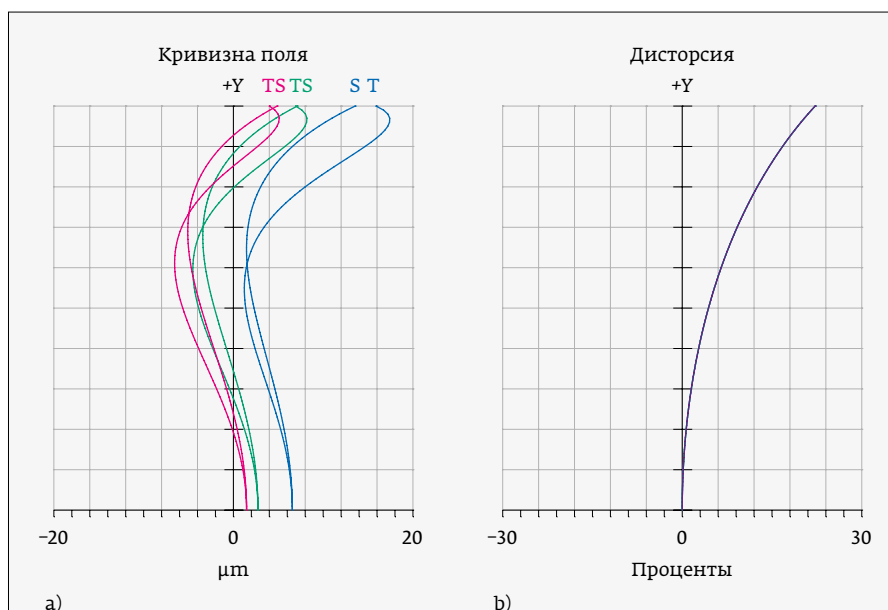


Рис. 9. Вариант № 4 – графики кривизны поля и дисторсии

Fig. 9. Option No. 4 – graphs of field curvature and distortion



and full flight simulators for human factors research. *12th International Conference, EPCE 2015*. DOI: 10.1007/978-3-319-20373-7_44.

12. **Baholdin A. V., Romanova G. I., Cukanova G. I.** *Teoriya i metody proektirovaniya opticheskikh sistem. Part I.* – SPb: NIU ITMO. 2011. 104 p.
Бахолдин А. В., Романова Г. И., Цуканова Г. И. *Теория и методы проектирования оптических систем. Ч. I.* – СПб: НИУ ИТМО. 2011. 104 с.
13. **Grammatin A. P., Romanova G. E., Balacenko O. N.** *Raschet i avtomatizatsiya proektirovaniya opticheskikh sistem. Ucheb. posobie.* – SPb: NIU ITMO. 2013. 128 p.
Грамматин А. П., Романова Г. Э., Балаценко О. Н. *Расчет и автоматизация проектирования оптических систем. Учеб. пособие.* – СПб: НИУ ИТМО. 2013. 128 с.
14. **Zapryagaeva L. A., Sveshnikova I. S.** *Raschet i proektirovanie opticheskikh sistem.* – M.: Logos. 2000. 581 p.
Запрыгаева Л. А., Свешникова И. С. *Расчет и проектирование оптических систем.* – М.: Логос. 2000. 581 с.
15. **GOST 19795-82** *Proektory izmeritel'nye. Obshchie tekhnicheskie usloviya.* Vveden 01.01.1984. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1988.
ГОСТ 19795-82 *Проекторы измерительные. Общие технические условия.* Введен 01.01.1984. – М.: Издательство стандартов, 1988.
16. **ZEMAX.** URL: <http://www.zemax.com>.

АВТОРЫ

Петр Сергеевич Завьялов, к. т. н., директор КТИ НП СО РАН, zavyalov@tdisie.nsc.ru; Новосибирск, Россия.
Евгений Владимирович Власов, научный сотрудник, КТИ НП СО РАН, vlasov@tdisie.nsc.ru; Новосибирск, Россия.
Алексей Владимирович Солдатенко, конструктор, КТИ НП СО РАН, tok9_11@mail.ru; Новосибирск, Россия.
Марина Андреевна Завьялова, к. т. н., научный сотрудник, КТИ НП СО РАН, mzav@tdisie.nsc.ru; Новосибирск, Россия.
Василий Станиславович Бартош, ведущий инженер, ИАиЭ СО РАН, vas@sl.iae.nsk.su; Новосибирск, Россия.

spherical screen is installed. This option is quite simple to implement, but it has been shown that there are certain disadvantages: a limited field of view (up to $\pm 26^\circ$) and a general asymmetry of the picture in terms of image quality. In the second lens variant, significantly better image quality characteristics are achieved with a larger field of view (up to $\pm 50^\circ$).

The results obtained can be used in modern simulation equipment, since they make it possible to create devices for the synthesis of a visual simulation that forms an environment for human eyes that is close enough to natural, which undoubtedly increases the visual comfort during the work of operators.

AUTHORS

Petr Sergeevich Zavyalov, Cand. Of Technical Sciences, Director of the Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of RAS; zavyalov@tdisie.nsc.ru; Novosibirsk, Russia.
Evgeny Vladimirovich Vlasov, Researcher, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of RAS; vlasov@tdisie.nsc.ru; Novosibirsk, Russia.
Alexey Vladimirovich Soldatenko, Designer, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of RAS; tok9_11@mail.ru; Novosibirsk, Russia.
Marina Andreevna Zavyalova, Cand. Of Technical Sciences, Researcher, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of RAS; mzav@tdisie.nsc.ru; Novosibirsk, Russia.
Vasily Stanislavovich Bartosh, Lead Engineer, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of RAS, vas@sl.iae.nsk.su; Novosibirsk, Russia.



Металлообработка. Сварка – Урал

международная выставка технологий,
оборудования, материалов для машиностроения,
металлообрабатывающей промышленности
и сварочного производства



15–18 марта 2022
Екатеринбург

крупнейший
специализированный
региональный проект в России

(342) 264-64-27
egorova@expoperm.ru
www.metal-ekb.expoperm.ru





Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphere.ru



Стоимость 1056 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1287 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1716 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru