



Расчет и оценка широкоугольных очков с высоким разрешением для трехмерного мультифокального наголовного дисплея

Е.В. Власов, П.С. Завьялов, Е.С. Жимулева
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Новосибирск, Россия

Приводится расчет и анализ оптической схемы широкоугольного очуляра для иммерсионного мультифокального наголовного дисплея. Очуляр основан на использовании светоделительного кубика в качестве делителя для формирования двух планов изображений. Угол поля зрения составляет $44^\circ \times 33^\circ$, 60° по диагонали. Максимальный радиус пятна рассеяния (RMS radius) составляет 13,2 мкм, при размере пиксела 9,3 мкм.

Ключевые слова: 3D изображение, наголовный дисплей, стереочуляры

Статья получена: 11.10.2024

Статья принята: 28.10.2024

ВВЕДЕНИЕ

Тенденция развития индивидуальных средств навигации, ориентации и контроля за движениями человека диктуется все более массовым их применением в таких областях человеческой деятельности как спорт, медицина, интерактивные компьютерные игры и военные задачи. К мобильным навигационным средствам военного назначения и их тактико-техническим и массогабаритным характеристикам предъявляются особые требования.

В настоящее время за рубежом очень активно развиваются технологии по построению очков дополненной реальности. Известны разработки

Design and Evaluation of High-Resolution Wide-Angle Oculars for a 3D Multifocal Head-Mounted Display

E. V. Vlasov, P. S. Zavialov, E. S. Zhimuleva
Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

The design and analysis of the optical circuit for the wide-angle oculars for an immersion multifocal head-mounted display are given. The ocular is based on the use of a beam-splitting cube as a splitter to generate two image planes. The field-of-vision angle is $44^\circ \times 33^\circ$, 60° diagonally. The maximum radius of the circle of confusion (RMS radius) is 13.2 μm , with a pixel size of 9.3 μm .

Keywords: 3D image, head-mounted display, stereoscopic lenses

Article received: 11.10.2024
Article accepted: 28.10.2024

INTRODUCTION

The development trend of individual aids for navigation, orientation and control over human movements is determined by their ever more widespread use in such areas of human activities as sports, medicine, interactive computer games and combat missions. The special requirements are imposed on the mobile navigation aids for military purposes and their tactical, technical and weight-dimensional specifications.

At present, the technologies of augmented reality goggles are being actively developed abroad. The developments provided by such companies as Epson (Epson Moverio BT-200, BT-300), Lumus, Microsoft (Microsoft HoloLens), Sony (Sony SmartEyeglass), Google (Google Glass) and others are popular. The structure of augmented reality goggles is based on several various technologies for image projection from a micro-

таких фирм как Epson (Epson Moverio BT-200, BT-300), Lumus, Microsoft (Microsoft HoloLens), Sony (Sony SmartEyeglass), Google (Google Glass) и др. В основе построения очков дополненной реальности используется несколько разных технологий проецирования изображения с микродисплея на полупрозрачный экран, расположенный перед глазом человека. Одна из технологий предполагает проецирование изображения при помощи стереокуляров [1-4].

Одним из существенных недостатков существующих и разрабатываемых очков дополненной реальности является очень малый угол поля зрения (Field Of View – FOV), порядка 20–40 градусов по диагонали. Увеличение же угла обзора в вышеописанных схемах приводит к существенному увеличению габаритов и массы очков.

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Все последующие расчеты стереокуляра для формирования объемного изображения сцены выполнены на основе Фурье-оптики с помощью программы оптического конструирования ZEMAX-EE фирмы Focus Software, Inc. В качестве источника изображения рассматриваются микродисплеи Low-Power AMOLED SXGA060 фирмы Olightek и FLCOS микродисплеи фирмы Forth Dimensional Displays с разрешением 1280×1024. В статьях [5,6] в результате дифракционного анализа линейной комбинации двух планов изображений было показано, что глаз аккомодирует на пиковую интенсивность кривой при любых aberrациях. Более того, установлено, что при различных размерах зрачка глаза интенсивность полусумм не остается постоянной величиной, поскольку глаз является одним из компонентов дисплея (комбинирование интенсивностей планов-изображений происходит на сетчатке). В программе расчет проведен в обратном ходе лучей, для видимой длины излучения в спектральном диапазоне от 486 нм до 656 нм. Рассматривается упрощенная модель глаза (Lotmare, Atchison) [7].

Окуляр представленный на рис. 1 содержит два плоских изображения генерируемых микродисплеями 1 и с помощью оптических элементов 2–5 формирует их мнимое изображение. Благодаря светоделительному кубу 2 мнимые изображения оказываются соосными и перпендикулярными зрительной оси. Излучения элементов изображений с микродисплеев фокусируются хрусталиком глаза в световые пятна изображений на сетчатке таким образом, чтобы максимум суммарной энер-

display onto a rear-projection screen located in front of the human eye. One of the technologies involves the image projection using the stereoscopic lenses [1-4].

One of the significant drawbacks of the available and developing augmented reality goggles is the very small field of view (FOV) that is equal to about 20–40 degrees diagonally. The viewing angle increase in the above-described circuits leads to a significant increase in the dimensions and weight of the glasses.

DESIGN OF THE OPTICAL SCHEME

All subsequent designs of the stereoscopic lens for the generation of a three-dimensional scene image were performed on the basis of Fourier optics using the ZEMAX-EE optical design program by Focus Software, Inc. The Low-Power AMOLED SXGA060 microdisplays by Olightek and FLCOS microdisplays by Forth Dimensional Displays with a resolution of 1280×1024 are considered as an image source. In the papers [5, 6] as a result of diffraction analysis of a linear combination of two image planes, it was shown that the eye accommodates to the curve peak intensity in the case of any aberrations. Moreover, it was found that at different eye's pupil sizes, the intensity of half-sums did not remain a constant value, since the eye was one of the display components (combination of the image plane intensities occurs on the retina). In the program, the design was performed in the beam retrace for the visible radiation length within the spectral range from 486 nm to 656 nm. A simplified model of the eye was considered. During the design, several eye models were checked (Lotmare, Atchison) [7].

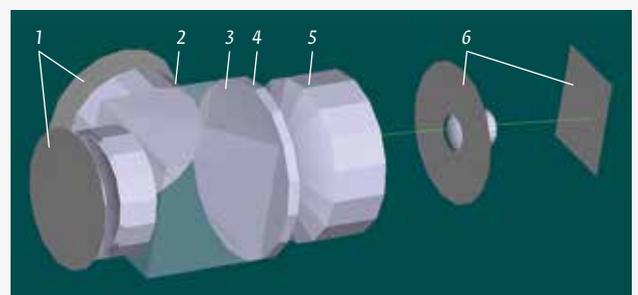


Рис. 1. Модель оптической системы стереоокуляра: 1 – микродисплеи; 2, 4, 5 – склеенные линзы; 3 – светоделительный куб; 6 – фовеа (центральная ямка сетчатки)

Fig. 1. Optical system model of the stereoscopic eyeglass: 1 – microdisplays; 2, 4, 5 – composite lenses; 3 – beam-splitting cube; 6 – fovea (central fovea of the retina)

гии находился в районе фовеа (центральной ямки сетчатки) глаза наблюдателя.

Расчет проводился для двух планов изображений, установленных на расстояниях 1 м (1 дптр) для ближнего плана и 4 м (0,25 дптр) для дальнего плана. Таким образом, обеспечивается объемное восприятие глубины резко отображаемого пространства от 1 метра до бесконечности. Предметы, расположенные на указанных расстояниях, находятся в фокусе человеческого глаза.

Система не является жестко съюстированной. Устройство с двумя встроенными стереоокулярами одевается на голову наблюдателя, из-за чего возможно смещение положения глаза по трем осям в диапазоне ± 2 мм (вдоль и поперек оптической оси). Кроме того, сам зрачок глаза, который является апертурной диафрагмой системы, перемещается по полю зрения в процессе наблюдения и это не должно качественно влиять на получаемое изображение.

Для достоверного восприятия получаемого изображения важно подобрать такой угол поля зрения, чтобы боковое зрение наблюдателя было задействовано в формировании сцены. Полученный в окуляре угол поля зрения составляет 44° (угол вращения глазного яблока при наблюдении $45-50^\circ$).

Для того чтобы было возможно перефокусироваться с одного плана на другой без видимого смещения объектов дополнительно задана функция, которая не позволяет смещаться одной и той же точке на изображениях в разных конфигурациях.

Расчет проводился на 16 конфигураций, учитывающих смещение зрачка, изменение оптики между светоделительным кубиком и микродисплеем, диоптрическую подвижку.

На рис. 2 представлена диаграмма пятен рассеяния для всех конфигураций. Видно, что максимальное ухудшение изображения возникает при смещении глаза поперек оптической оси, а также при введении дополнительной отрицательной оптической силы. Максимальный радиус пятна рассеяния (RMS radius) составляет 13,2 мкм при размере пиксела 9,3 мкм. Дисторсии не превышают 5%, кривизна поля не более 0,05 мм.

В ходе работы система была исследована на появление призраков в последовательном режиме. На рис. 3 показано изображение, полученное рассчитанной оптической системой в программе Zemax в непоследовательном режиме. Видно, что полученная картинка достаточно контрастна, призраки и блики на изображении отсутствуют, дисторсия, хроматическая aberrация выражены слабо.

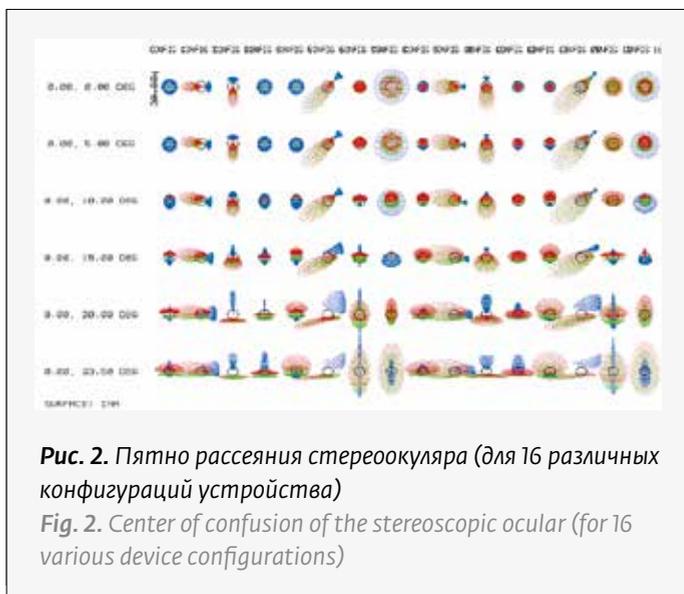


Рис. 2. Пятно рассеяния стереоокуляра (для 16 различных конфигураций устройства)

Fig. 2. Center of confusion of the stereoscopic ocular (for 16 various device configurations)

The ocular shown in Fig. 1 contains two flat images generated by the microdisplays 1 and generates their false image using the optical elements 2-5. Due to the beam-splitting cube 2, the false images are coaxial and perpendicular to the optical axis. The radiation of the image elements from the microdisplays is focused by the crystalline lens into the light spots of images on the retina in such a way that the maximum total energy is in the fovea region (central fovea of the retina) of the observer's eye.

The design was performed for two image planes installed at the distances of 1 m (1 D) for the near plane and 4 m (0.25 D) for the far plane. Thus, a 3D depth perception of the sharply displayed space from 1 meter to infinity is ensured. The objects located at the specified distances are in focus of the human eye.

The system is not rigidly aligned. The device with two built-in stereoscopic lenses is placed on the observer's head due to which the eye position can be shifted along three axes within the range of ± 2 mm (along and across the optical axis). In addition, the eye's pupil being the aperture diaphragm of the system, is moved across the field of view during the observation process and this should not qualitatively affect the resulting image.

For reliable perception of the resulting image, it is important to select such a field-of-vision angle that the observer's peripheral vision is involved in the scene generation. The field-of-vision angle obtained in the ocular is 44° (the eyeball rotation angle during observation is $45-50^\circ$).

In order to be able to refocus from one plane to another without any visible displacement of objects,

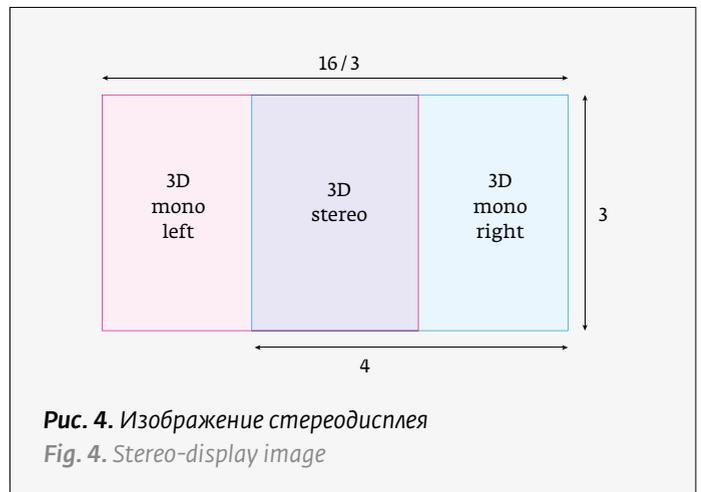
Разработанная стереопара окуляров позволяет построить широкоформатное 3D-изображение, не меняя форматов левого и правого окуляров. Рис. 4 – это изображение формируемое окулярами на «бесконечности».

Исходный формат матриц 4×3 , или 1280×1024 пикселей. Пусть площади 3D-стерео и 3D-моно одинаковы. Тогда в каждом окуляре площадь моно будет составлять $1/3$ матрицы, а общая площадь 3D изображения увеличится на 33,3%. Горизонталь изображения будет равна $4 + 4/3 = 16/3$. Результирующий формат равен $(16/3) \times 3$, или 16×9 , что соответствует широкоформатному 3D изображению.

В нашем случае, при «угловом» формате окуляров $44^\circ \times 33^\circ$, (4×3) получим $(44^\circ + 44^\circ/3) \times 33^\circ$, или $58^\circ 40' \times 33^\circ$, т. е. имеем почти добавку в 12° к полю зрения одного окуляра.

Можно сделать формат 2×1 . При этом левое и правое изображения будут перекрываться на половину, а общее 3D поле составит $66^\circ \times 33^\circ$, FOV порядка 74° .

На основе расчетов оптической схемы окуляров была разработана конструкторская документация на корпус. В конструкции окуляров реализованы такие функциональные особенности как: регулировка межцентрового расстояния окуляров и оптическая диоптрийная подвижка на величину ± 1 дптр, предназначенные для подстройки окуляра



an additional function is provided that does not allow the same point on the images in various configurations to be shifted.

The design was performed for 16 configurations with due regard to the pupil displacement, changes in optics between the beam-splitting cube and the microdisplay, and the dioptric shift.

Figure 2 shows the circle of confusion diagram for all configurations. It is evident that the maximum image deterioration occurs when the eye is displaced across the optical axis, as well as when additional negative refractive power is introduced. The maximum circle of confusion radius (RMS radius) is $13.2 \mu\text{m}$ with a pixel size of $9.3 \mu\text{m}$. The distortions do not exceed 5%, the field curvature is no more than 0.05 mm.

During the process, the system was examined for the occurrence of spirits in the series operation mode. Fig. 3 shows the image obtained by the designed optical system in the Zemax program in the non-sequential mode. It is evident that the obtained image is sufficiently high-contrast, the spirits and glare are absent in the image, the distortion and chromatic aberration are weakly expressed.

The developed stereoscopic pair of oculars allows to generate a wide-format 3D image without any format changes of the left and right oculars. Figure 4 is an image obtained by the oculars with the “infinite” settings.

The original array format is 4×3 , or 1280×1024 pixels. Let the areas of 3D stereo and 3D mono areas be the same. Then in each ocular, the mono area will be $1/3$ of the array, and the total area of the 3D image will be increased by 33.3%. The image horizontal will be equal to $4 + 4/3 = 16/3$. The resulting format is $(16/3) \times 3$, or 16×9 that corresponds to a wide-format 3D image.



Рис. 3. Изображение, формируемое оптической системой на сетчатке человека

Fig. 3. Image generated by the optical system on the human retina

к особенностям глаз наблюдателя. По разработанной конструкторской документации были изготовлены узлы и детали, проведена сборка макета стереоокуляров рисунок 5.

В результате проведенных исследований и оценки комплексных критериев качества изображения формируемого оптическим блоком очков дополненной реальности на схематических моделях глаза было показано, что: максимальный радиус пятна рассеяния (RMS radius) составляет 13,2 мкм при размере пиксела 9,3 мкм; дисторсия не превышает 5%, кривизна поля не более 0,05 мм, эти aberrации могут быть скорректированы программным образом; полученное изображение на сетчатке глаза достаточно контрастно, призраки и блики на изображении отсутствуют, дисторсия, хроматическая aberrация выражены слабо.

В перспективе планируется применение такого типа систем при разработке тренажеров нового поколения для космонавтов и авиатренажерах, а также при создании комплексов управления роботизированными аппаратами.

REFERENCES

1. **H. Hua, L. D. Brown and C. Gao.** Scape: supporting stereoscopic collaboration in augmented and projective environments. *IEEE Comp. Graph. Appl.* 2004;24:66–75.
2. **A. Sisodia, A. Riser and M. Bayer.** Advanced helmet mounted display (AHMD) for simulator applications. *Proc. SPIE.* 2006;6224:622400.
3. **J. P. Rolland and H. Fuchs.** Optical versus video see-through headmounted displays in medical visualization. *Presence.* 9, 287–309
4. **Vlasov E. V., Paterikin V. I. Prosvetnye. 3D mul'tifokal'nye displei na osnove ob'emnoj virtual'noj sredy s dobavlennoj fizicheskoj real'nost'yu.** XIII Mezhdunarodnye nauchnyj kongress i vystavka. *Interekspo Geo-Sibir'-2017. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «SibOptika-2017»* Т. 1. Sbornik materialov. URL: <https://geosib.sgugit.ru/congress/sborniki/collections-of-materials-of-international-scientific-conference-interexpo-geo-siberia-2017/?ysclid=m37u16uxmu422490737>.
Власов Е. В., Патерикин В. И. Просветные 3D мультифокальные дисплеи на основе объемной виртуальной среды с добавленной физической реальностью. XIII Международные научный конгресс и выставка. Интерэкспо Гео-Сибирь-2017. Международная научная конференция «СибОптика-2017» Т. 1. Сборник материалов. URL: <https://geosib.sgugit.ru/congress/sborniki/collections-of-materials-of-international-scientific-conference-interexpo-geo-siberia-2017/?ysclid=m37u16uxmu422490737>.
5. **Kovalev A. M., Vlasov E. V.** Difrakcionnaya glubina 3D izobrazhenij, stimuliruyushchih akkomodatsiyu glaza. *Avtometriya.* 2014;50(1):3–8.
Ковалев А. М., Власов Е. В. Дифракционная глубина 3D изображений, стимулирующих аккомодацию глаза. *Автометрия.* 2014;50(1):3–8.
6. **Kovalev A. M.** O mul'tifokal'nyh displayah, difrakcionnoj glubine fokusa i vizual'nom komforte. *Avtometriya.* 2010;46(3):86–94.
Ковалев А. М. О мультифокальных дисплеях, дифракционной глубине фокуса и визуальном комфорте. *Автометрия.* 2010;46(3):86–94.
7. **Vlasov E. V.** Sposoby povysheniya kontrasta kombinirovannyh izobrazhenij i linejnosti stimula akkomodatsii glaza v mul'tifokal'nyh trekhmernykh displayah. *Avtometriya.* 2018(1):78–84.
Власов Е. В. Способы повышения контраста комбинированных изображений и линейности стимула аккомодации глаза в мультифокальных трехмерных дисплеях. *Автометрия.* 2018(1):78–84.



Рис. 5. Макет стереоокуляров

Fig. 5. Model of the stereoscopic oculars

In our case, with an “angular” format of oculars of $44^\circ \times 33^\circ$, (4×3) we get $(44^\circ + 44^\circ/3) \times 33^\circ$, or $58^\circ 40' \times 33^\circ$, i. e. we have almost an addition of 12° to the field of view of one ocular.

It is possible to obtain a 2×1 format. In this case, the left and right images will overlap by half, and the total 3D field will be $66^\circ \times 33^\circ$, with the FOV of about 74° .

Based on the optical scheme designs for the oculars, the design documentation for the body was developed. The ocular structure implements such operational features as adjustment of the inter-center distance of the oculars and optical dioptric adjustment by ± 1 D obtained to adjust the oculars to the features of the observer’s eyes. According to the developed design documentation, the units and parts were manufactured, and a model of stereoscopic oculars was assembled (Figure 5).

As a result of the research conducted and evaluation of comprehensive criteria of the image quality generated by the optical unit of augmented reality goggles, the eye models showed that the maximum center of confusion radius (RMS radius) is $13.2 \mu\text{m}$ with a pixel size of $9.3 \mu\text{m}$; the distortion does not exceed 5%, the field curvature is no more than 0.05 mm, these aberrations can be adjusted by software; the resulting image on the eye retina is sufficiently high-contrast, the spirits and glare are absent in the image, the distortion and chromatic aberration are weakly expressed.

In the future, it is planned to use this type of system in the development of new generation simulators for the astronauts and flight simulators, as well as in the development of control systems for the robotic devices.



Главное событие отрасли
в России и странах СНГ

ФОТОНИКА

МИР
ЛАЗЕРОВ
И ОПТИКИ

1–4 апреля 2025

19-я международная специализированная выставка
лазерной, оптической и оптоэлектронной техники

Реклама



12+

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

www.photonics-expo.ru



ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ



ЭКСПОЦЕНТР