

На правах рукописи



Власов Евгений Владимирович

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ФОРМИРУЕМОГО ПРОСТРАНСТВА В
НАГОЛОВНЫХ МУЛЬТИФОКАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОБЪЕМНОГО
ОТОБРАЖЕНИЯ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Специальность: 2.2.6

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН).

**Научный
руководитель:**

Юрий Васильевич Чугуй,
доктор технических наук, профессор.

Марина Андреевна Завьялова,
кандидат технических наук.

**Официальные
оппоненты:**

Шойдин Сергей Александрович,
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и
технологий», должность: профессор кафедры фотоники и
приборостроения;

Вяткин Сергей Иванович,
кандидат технических наук, Федеральное
государственное бюджетное учреждение «Институт
автоматики и электрометрии», должность: старший
научный сотрудник лаборатории синтезирующих систем
визуализации.

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева».

Защита диссертации состоится «10» марта 2026 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, д. 20, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан ___ января 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

При разработке стереоскопических дисплеев, не вызывающих ощущения дискомфорта при восприятии объёмных изображений, основная сложность состоит в создании и согласовании стимулов аккомодации и конвергенции глаз. По сути, наличие стимулов аккомодации означает, что изображение стереопары должно быть трехмерным, т.е. иметь протяженность по глубине для каждого элемента изображения (пиксела). Такое трехмерное изображение, при фиксации взгляда на неподвижном объекте имеющее контрастность на сетчатке (субъективно воспринимаемая как чёткость, или резкость), является стимулом для аккомодации глаза. В настоящее время существует различные способы позволяющие создавать множество планов изображений и их комбинирования для формирования объемной картины.

Данная работа посвящена исследованию и разработке методов повышения качества формируемого пространства, основанного на многоплановых стереоскопических принципах построения объемного изображения, необходимого для разрешения аккомодационно-конвергентного конфликта возникающего при построении 3D картины в простых стереоскопических системах. В качестве основного критерия качества изображения предлагается провести анализ аксиального распределения интенсивности изображений и найти количественные характеристики дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности планов и диаметра зрачка глаза, для определения оптимального расстояния между планами изображений. Для улучшения качества трехмерной картины исследовать способы повышения контраста объемного изображения и повышения линейности стимула аккомодации глаза с учетом варьируемого диаметра зрачка.

Степень разработанности проблемы

Идеи построения мультифокальных систем отображения визуальной информации рассматривались в литературе не однократно. В связи с этим уместно отметить работы и исследования J.Rolland, K.Akeley, Hong Hua, G.Love, Ковалев А.М. и др. Существующие методики формирования трехмерной картины основаны на построении многоплановых изображений и их комбинировании для получения мультифокального объемного изображения. В исследованных работах расстояние между планами-изображениями, разнесенными по глубине варьируется от 0,14 до 2 дптр. Однако не приведены критерии оценки выбора этих расстояний и таких существенных факторов как распределение интенсивности изображений и дифракционной глубины пространства. А также требуется оценка соответствия влияния полученного объемного изображения естественному зрительному восприятию человека. В

качестве основного критерия такой оценки в данной работе предлагается исследовать линейность стимула аккомодации глаза человека при просмотре 3D картины.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов повышения качества формируемого пространства в наголовных мультифокальных системах объемного отображения визуальной информации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Сформировать критерии комбинирования планов изображений для формирования мультифокального объемного пространства, наиболее соответствующего естественному зрительному восприятию человека, чем простое стереоизображение. Выполнить анализ аксиального распределения интенсивности изображений и найти количественные характеристики дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности планов и диаметра зрачка глаза для определения оптимального расстояния между планами изображений.

2. Исследовать способы повышения контраста объемного изображения и повышения линейности стимула аккомодации глаза с учетом варьируемого диаметра зрачка при формировании трехмерной картины, основанной на комбинировании планов изображений.

3. Разработать макет стереоскопического дисплея с бифокальными окулярами с согласованными стимулами глубины – конвергенции и аккомодации глаз и провести ряд экспериментов с целью проверки предложенных способов формирования объемного изображения.

Методы исследований

Для решения указанных задач в ходе работы были использованы компьютерное проектирование оптических систем, математическое моделирование, макетирование и физические эксперименты.

Новыми результатами научной работы являются:

1. Сформированы критерии, основанные на проведенном анализе аксиального распределения интенсивности изображений, а также найдены количественные характеристики дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности планов и диаметра зрачка глаза, для комбинирования планов изображений и формирования мультифокального объемного пространства, наиболее соответствующего естественному зрительному восприятию человека, чем простое стереоизображение.

2. Предложены и исследованы способы повышения контраста объемного изображения и повышения линейности стимула аккомодации глаза в трехмерных дисплеях при диаметрах зрачка глаза $3 \text{ мм} \pm 10\%$ на модели глаза Атчисона.

3. Разработан экспериментальный стереоскопический дисплей с бифокальными окулярами с согласованными дистальными стимулами глубины – конвергенции и аккомодации глаз, на основе полученных способов формирования объемного изображения. Проведены экспериментальные

исследования восприятия человека показывающие, что мультифокальные 3D дисплеи предоставляют достаточно надежную информацию об удаленности и размерах предметов, что позволяет не нарушать закона константности восприятия.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Расчет аксиального распределения интенсивности изображений и определение количественных характеристик дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности и диаметра зрачка глаза показали, что комфортный диапазон глубин планов изображений составляет от 0.28 до 0.83 дптр при изменении остроты разрешающей способности глаза от 1 до 3 угл. мин.

2. Способы повышения контраста объемного изображения и повышения линейности стимула аккомодации глаза в трехмерных дисплеях позволяют уменьшить потери контраста с 20% до 8 % при плохой освещенности, при нормальной освещенности и ярком свете до 2 %. Отклонения линейности стимула аккомодации при этом составляют не более 5 %.

3. Анализ влияния устройства просмотра – мультифокального 3D дисплея на визуальное восприятие наблюдателя в оценке глубины и размеров объектов показал, что, помимо визуального комфорта, 3D дисплей обеспечивает прямые и косвенные признаки глубины, позволяющие естественным образом оценивать расстояния и размеры предметов.

Личный вклад. В диссертации представлены результаты, полученные лично автором или при его непосредственном участии. Автором проведен анализ структурных схем дисплеев для виртуальных сред, решена задача определения инструментов, которые позволяют создавать n-ное количество планов изображений, а так же задача комбинирования планов изображений. Выполнен анализ аксиального распределения интенсивности изображений и определены количественные характеристики дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности планов и диаметра зрачка глаза. Исследованы способы повышения контраста объемного изображения и повышения линейности стимула аккомодации глаза в трехмерных дисплеях при диаметрах зрачка глаза $3 \text{ мм} \pm 10\%$ на модели глаза Атчисона. Проведены экспериментальные исследования восприятия человека с использованием разработанного экспериментального стереоскопического дисплея с бифокальными окулярами с согласованными дистальными стимулами глубины – конвергенции и аккомодации глаз.

Практическая значимость работы

При разработке мультифокальных стереодисплеев учтен ряд особенностей влияющих на соответствие формируемого пространства естественному зрительному восприятию. Разработаны критерии оценки таких важных и существенных факторов как распределение интенсивности изображений и дифракционной глубины пространства, а также оценено соответствие влияния полученного объемного изображения естественному зрительному восприятию человека. Предложены основные способы повышения качественного представления глубины изображаемого пространства: повышение контраста

объемного изображения и повышение линейности стимула аккомодации глаза. В результате реализации проекта разработаны технологии формирования мультифокального стереоизображения для управляющего компьютера с учетом психофизических свойств человеческого зрения и технология на разработку и изготовление оптического блока мультифокального дисплея со всей технической документацией на оптический блок и оптическую схему.

На основе разработанного способа формирования планов-изображений, стимулирующих аккомодацию глаза, создан прототип мультифокального стерео дисплея. Работа созданного прототипа позволяет демонстрировать характеристики, соответствующие предъявляемым требованиям для использования в работе телеоператоров РТК (роботизированных транспортных комплексов), в процессе подготовки на тренажерах и других дистанционных телеметрических системах.

Проведены исследования влияния формируемого пространства на восприятие человеком с использованием разработанного и запатентованного в КТИ НП СО РАН совместно с НФ ИФП СО РАН «КТИ ПМ» и ООО «Софтлаб-НСК» экспериментального стереоскопического дисплея с бифокальными окулярами.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на международных научных конгрессах «ГЕО-Сибирь» в 2011, 2012, 2014, 2015, 2017гг. (Новосибирск) и на Космическом Форуме (2011), посвященному 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина (Звездный городок).

Результаты исследований представлены в отчетах научно-исследовательских работ КТИ НП СО РАН:

проект П.11.1.2: Оптико-информационные системы коллаборации на основе объёмной виртуальной среды с добавленной физической реальностью (номер госрегистрации 01201364410). за 2013-2016 гг.";

проект П.11.1.2: «Оптико-информационные системы коллаборации на основе физической среды с добавленной виртуальной реальностью» (номер госрегистрации 0320-2016-0002) за 2016-2020гг.

Получен патент на изобретение №2609285 "Способ формирования многопланового изображения и мультифокальный стереоскопический дисплей", Бартош В.С., Белого И.В., Власов Е.В., Кравченко Ю.Л., Огородников Д.В., приоритет 05.11.2015г., дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 01.02.2017.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, среди них 9 статей в изданиях входящих в перечень ВАК РФ; 5 статей в журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus и Web of Science; 7 публикаций в сборниках трудов и материалов международных и российских конференций; получен 1 патент РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемой литературы из 63 наименований, содержит 103 страницы основного текста, 59 рисунков, одно приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи диссертации, новизна и практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе, имеющей обзорный характер, описаны основы формирования трехмерного изображения и проведён анализ структурных схем наголовных дисплеев для виртуальных сред трёх типов: ретрорефлективной, иммерсивной и просветной. Особое внимание уделено возможности обеспечения визуального комфорта в любой из виртуальных сред. Приводятся принципы действия, основные технические характеристики и функциональные возможности, основанных на указанных методах. Показаны их достоинства и недостатки.

Вторая глава посвящена анализу аксиального распределения интенсивности изображений и определению количественных характеристик дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности планов и диаметра зрачка глаза.

На практике, при использовании в наголовных дисплеях матриц типа AMOLED и FLCOS с разрешением от 800×600 до 1920×1200 , источник света минимального размера – это квадрат со стороной $9.6 \div 15$ мкм. По законам геометрической оптики микродисплейный пиксел проецируется на сетчатку в пиксел изображения – квадратную область со стороной $2r$, размеры которой можно найти исходя из поля зрения дисплея. Обычно угловые размеры пиксела изображения $\gamma \approx 2 \div 3$ угл. мин., а ширина пиксела $2r = \gamma f$, где f – фокусное расстояние глаза. При $f = 16.7$ мм $2r = 9.7 \div 14.6$ мкм, т.е. размеры пикселов источника и изображения практически совпадают.

Основные расчеты выполнены на основе Фурье–оптики с помощью программы оптического конструирования ZEMAX–EE фирмы Focus Software, Inc. при следующих ограничениях: длина волны $\lambda = 550$ нм, что соответствует самому низкому порогу спектральной чувствительности для фотопического (колбочкового, цветового) зрения; диаметр a аподизированного зрачка изменяется от 2 мм до 6 мм; полуширина пиксела $r = 2.5, 5$ и 7.5 мкм, что с погрешностью $< 3\%$ соответствует угловому разрешению $\gamma = 1, 2$ и 3 угловым минутам. Для расчёта распределений интенсивности вдоль зрительной оси использован оператор концентрации энергии DENF – Diffraction encircled energy (fraction). Этот оператор может вычислять долю энергии дифракционного пятна в квадрате, заданном полушириной r . Нормализованные результаты расчёта на модели глаза Атчисона для входного зрачка диаметром $a = 3$ мм показаны на рисунке 1.

Для перевода смещений фокуса δ в диоптрийную метрику применялось соотношение $\delta(\text{дптр}) = \delta(\text{мкм}) / \{n[f(\text{мм})]^2\}$, где $n = 1.336$ – показатель преломления стекловидного тела, f – фокусное расстояние глаза. В качестве предела, который определяет дифракционную глубину фокуса, выбрано уменьшение пиковой интенсивности на 20% (пунктирная линия). Нетрудно видеть, что глубина фокуса увеличивается практически линейно от 0.28 до 0.83 дптр при уменьшении остроты зрения от 1 до 3 угл. мин.

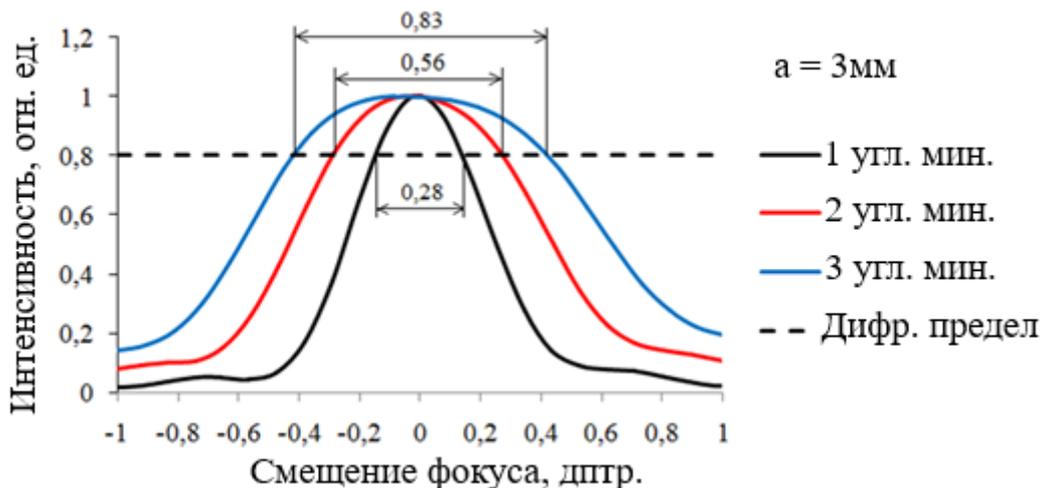


Рисунок 1 – Нормализованные результаты расчёта на модели глаза Атчисона для входного зрачка диаметром $a = 3$ мм

Для подтверждения достоверности исследований проведен дифракционный анализ изображений пиксела на программе Zemax для модели Атчисона. В качестве пиксела использовалась матрица 7×7 точек при расстоянии между точками $5/3$ мкм, так что размер пиксела $2r = 10$ мкм. Расчёт проводился для изображения в фокусе и при дефокусировке на ± 0.28 дптр., или ДГФ = 0.56 дптр для разрешения 2 угл. мин. Изображения интенсивностей пикселов приведены на рис. 2: а) в виде 3D поверхности, и б) на плоскости в псевдоцвете (false color). На рис. 2а представлены поверхности рассеяния на «ступеньках» пиксела. При детальном рассмотрении рис. 2б можно обнаружить, что на уровне интенсивности 50% в пределах дифракционной глубины сохраняются размеры пиксела $2r$ по горизонтали и вертикали, но уменьшаются размеры по диагонали. Пиксел приближается к округлой форме. Заметен небольшой астигматизм, вызванный поворотом зрительной оси относительно оптической оси глаза. В целом, компьютерный эксперимент подтвердил достоверность проведенных исследований.

Дифракционная глубина фокуса (ДГФ) определялась на двух моделях глаза на длине волны $\lambda = 550$ нм. Диаметр аподизированного зрачка изменялся от 2 мм до 6 мм. Разрешение изображений – от одной до трёх угловых минут. Процедура определения ДГФ для заданной модели, зрачка и разрешения состояла в следующем: для выбранного зрачка a в согласии с (2) задавался коэффициент гауссовой аподизации $G = 0,115(a/2)^2$ для функции $A(\rho) = \exp[-G(\rho)^2]$, где ρ – нормализованный зрачок в программе Zemax; вычислялась функция DENF для заданного размера полуширины пиксела r ; выполнялась нормализация кривой DENF для получения пиковой интенсивности; на уровне 80% от пиковой интенсивности по кривой DENF рассчитывалась ДГФ.

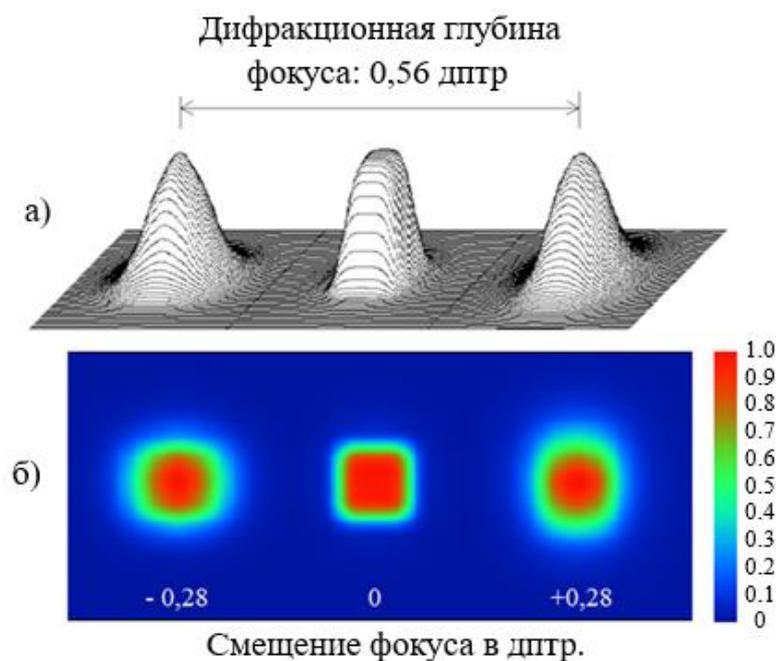


Рисунок 2 – Изображения интенсивностей пикселей: а) в виде 3D поверхности б) на плоскости в псевдоцвете (false color)

Результаты показаны на рис. 3. Они дополнены двумя кривыми: дифракционным пределом ДГФ и данными субъективного эксперимента Кэмпбелла. Дифракционный предел $4\lambda/a^2$ получен для глаза без aberrаций. При зрачках $2\div 3$ мм и разрешении 1 угл. мин. для обеих моделей наблюдается близость ДГФ к предельной. В диапазоне зрачков $3\div 4$ мм происходит линейное возрастание ДГФ при уменьшении остроты разрешающей способности.

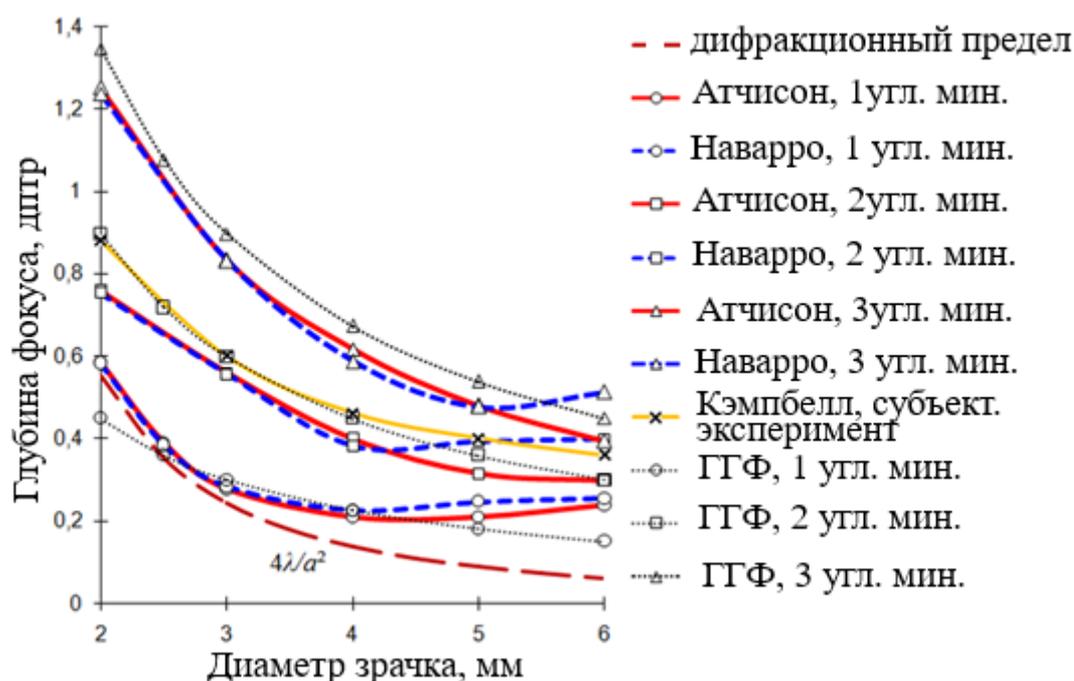


Рисунок 3 – Зависимость глубины фокуса от диаметра зрачка глаза

При зрачках $4 \div 6$ мм возрастают aberrации, особенно на модели Наварро, диапазон ДГФ сокращается, но закономерность увеличения ДГФ при уменьшении остроты зрения остаётся. Наблюдается хорошее согласие с данными субъективного эксперимента Кэмпбелла на разрешении 2 угл. мин.

В третьей главе рассмотрены проблемы потери контраста и нелинейности стимула аккомодации глаза при комбинировании изображений в трехмерных дисплеях. Предложены способы повышения качества формирования картины, для улучшения естественного аккомодирования глаза на скомбинированное изображение в пространстве.

Рассматривается система формирующая объемное изображение путем линейной комбинации ограниченного числа плоскопараллельных планов-изображений, распределенных по глубине пространства, со зрачком 3 мм на модели глаза Атчисона.

На рисунке 4 показаны распределения аксиальных интенсивностей изображений P1 и P2 для разных коэффициентов β при $a=3$ мм. Линия *max* представляет собой максимумы функций полученных от комбинированных изображений с двух планов, рассчитываются комбинации по формуле:

$$I(x,y,z) = I(x,y) [PSFA(z - Z_n) (1 - \beta(x,y)) + PSFA(z - Z_f) \beta(x,y)], \quad (1)$$

где $I(x,y)$ – двумерное изображение сцены; $PSFA(z)$ – аксиальное распределение интенсивности; Z_n, Z_f – глубина планов P1, P2 в дптр; $\beta(x,y)$ – относительное положение точки на интервале $[Z_n Z_f]$. Как видно из кривой максимальных значений *max* появляются заметные потери контраста на $20 \div 30$ %.

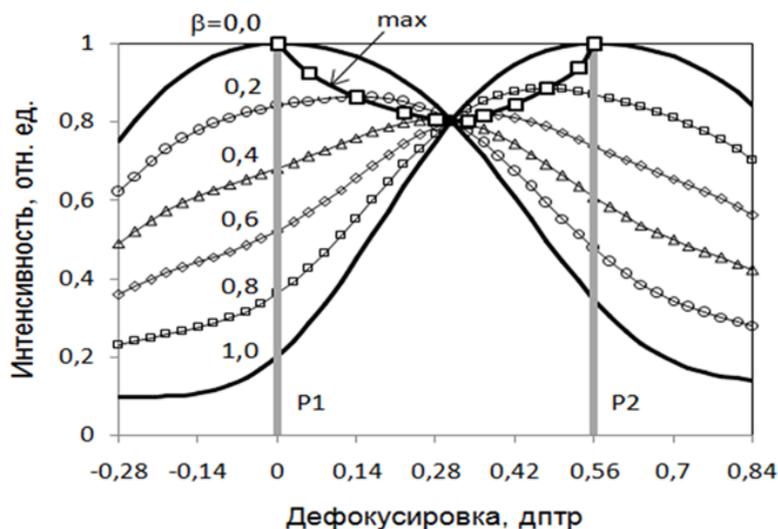


Рисунок 4 – Линейные комбинации аксиальных интенсивностей изображений P1, P2 для разных коэффициентов β при $a=3$ мм; *max* – кривая максимальных значений комбинаций.

Одним из основных усложняющих факторов расчетов повышения контраста и выравнивания стимула аккомодации глаза является непостоянный диаметр зрачка глаза. При различных размерах зрачка глаза интенсивность полусумм тоже меняется, так как глаз является одним из компонентов дисплея (комбинирование интенсивностей планов-изображений происходит на сетчатке).

Дальнейшей целью работы является исследование способов повышения контраста объемного изображения и повышения линейности стимула аккомодации глаза в трехмерных дисплеях при диаметрах зрачка глаза $3 \text{ мм} \pm 10\%$ на модели глаза Атчисона.

Предлагается ввод дополнительных коэффициентов $k1=(1 - \beta(x,y))$ и $k2=\beta(x,y)$ в формулу (1) и их нормирование:

$$I(x,y,z) = I(x,y) [PSFA(z - Z_n) k1 + PSFA(z - Z_f) k2]. \quad (2)$$

Как видно из представленных графиков на рисунке 5 комбинации планов изображений, оптимизация очень хорошо справляется с поставленной задачей, если ее проводить отдельно, для каждого диаметра зрачка глаза. Однако в реальности же, это накладывает ряд ограничений на разработку мультифокальных 3D дисплеев. Придется следить за размером диаметра зрачка и пересчитывать коэффициенты для текущего значения. Для того чтобы избежать данной ресурсозатратной операции предлагается проводить нормализацию коэффициентов $k1$ и $k2$ сразу для зрачка $3 \text{ мм} \pm 10\%$.

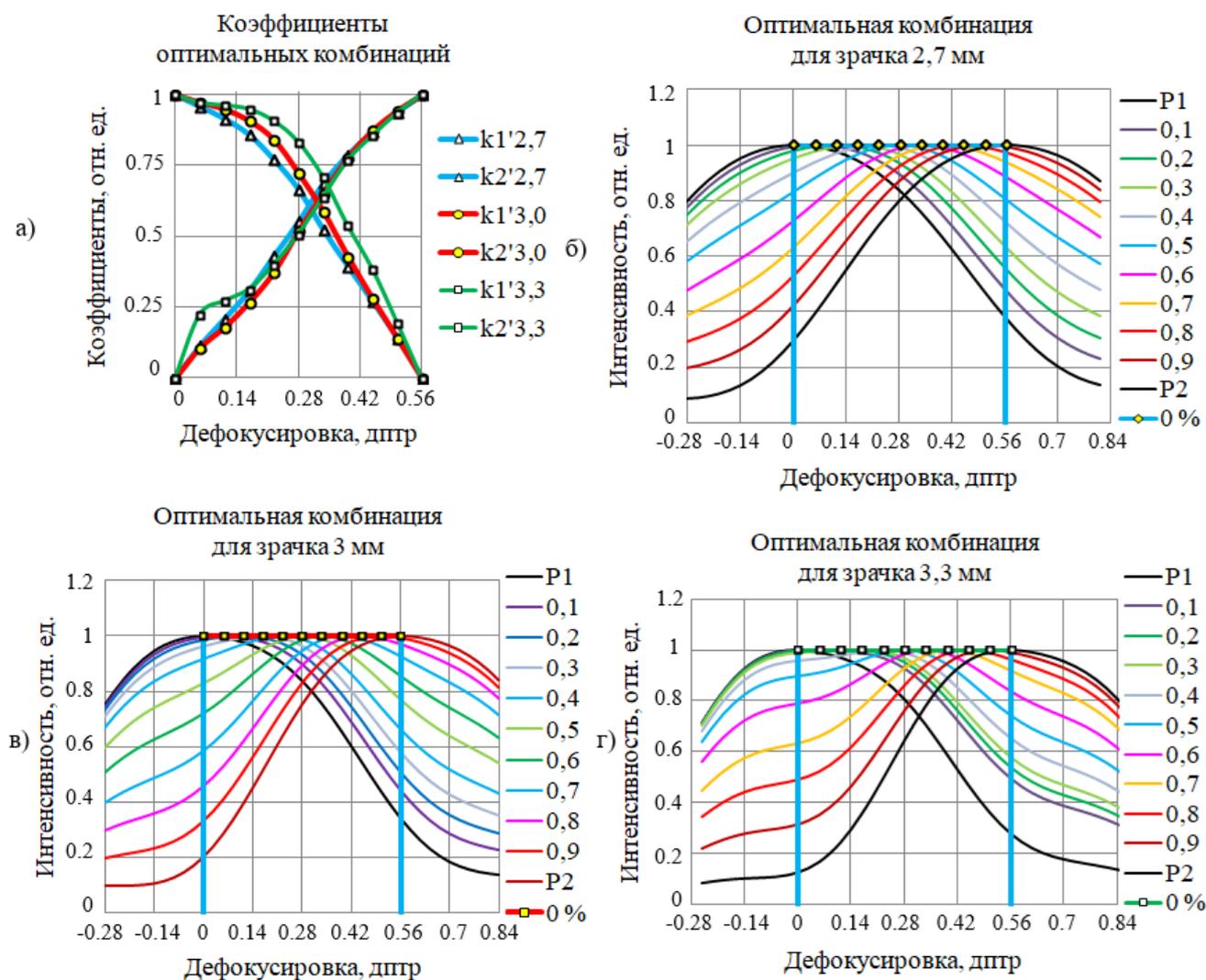


Рисунок 5 – Результаты комбинирования планов изображений: а) Коэффициенты оптимизации для зрачков глаза с диаметрами 2,7 мм; 3 мм; 3,3 мм, б) Комбинация для зрачка диаметром 2,7 мм, в) Комбинация для зрачка диаметром 3 мм, в) Комбинация для зрачка диаметром 3,3 мм

Такая оптимизация приводит к небольшим провалам контраста и отклонению стимула аккомодации от идеального линейного. Для наглядности погрешности отражены на рисунке 6.

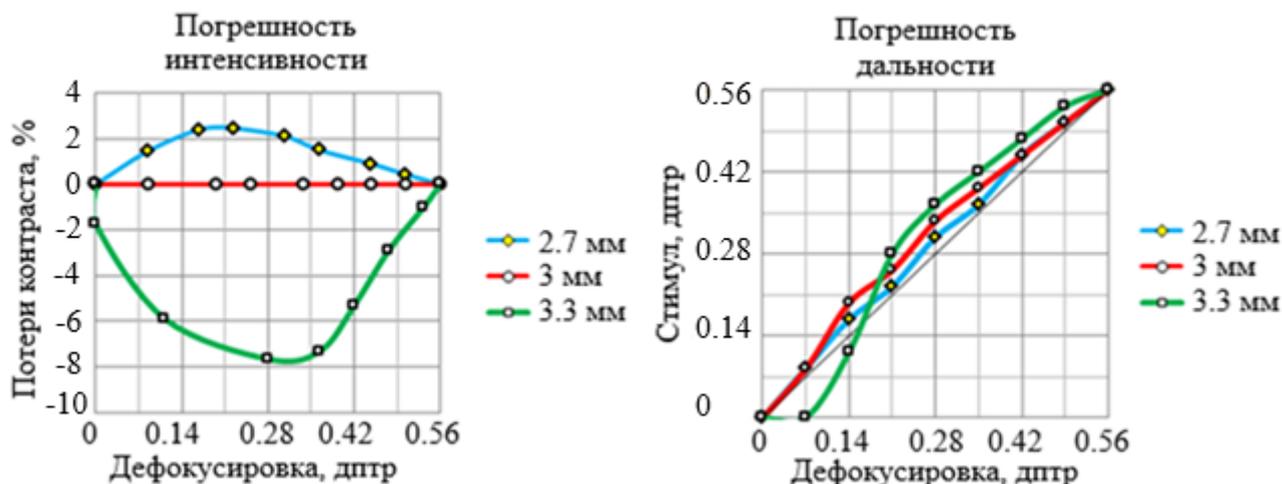


Рисунок 6 – Погрешности оптимизации

Данный способ, повышения контраста комбинированных изображений в мультифокальных трехмерных дисплеях, показывает очень неплохие результаты. Потери контраста не превышают 8 % при плохой освещенности, при нормальной освещенности и ярком свете не превышают 2 %. Отклонения линейности стимула аккомодации не превышают 5 %. Что, несомненно, улучшает правильность аккомодирования глаза на скомбинированное изображение в пространстве.

В **четвертой** главе исследованы способы формирования трехмерного изображения формирующие стимулы аккомодации для глаз человека. Для схем наголовных дисплеев иммерсивной и просветной виртуальной сред, рассчитаны мультифокальные окуляры. Предложены способы решения проблемы светопотерь такого типа дисплеев. Для наиболее перспективного варианта четырехпланового мультифокального дисплея приведены способы увеличения углового поля зрения и рассмотрена его возможная реализация.

Технические характеристики, комфортность восприятия и возможная интерактивность реальных и виртуальных предметов среды во многом зависит от вида дисплея персонального пользования. При построении систем многоплановых изображений исследовались структурные схемы с применением:

- светоделительных элементов;
- активных оптических переключаемых элементов (жидкие линзы);
- вращателей поляризации и двулучепреломляющих кристаллов.

Показано, что явным недостатком дисплеев, построенных на принципе формирования планов изображений только с помощью светоделительных элементов, является ограниченное число планов. Проведенный дифракционный анализ пиксельных изображений на основе определенных количественных

характеристик дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности и диаметра зрачка глаза, а также рассчитанные потери контраста вносят свои изменения в формулу построения изображений для ближнего и дальнего планов. На основе этих данных оптимальным межплановым расстоянием является значение 0,6 – 0,8 дптр. Это диоптрийное расстояние позволяет построение ограниченного объема глубины. К примеру, интервал от 30 см (3,33 дптр) до 36,6 см (2,73 дптр), интервал от 70 см (1,43 дптр) до 1,2 м (0,83 дптр), интервал от 1,18 м (0,85 дптр) до 4 м (0,25 дптр). Как видно, если требуется построить объемное изображение на расстоянии вытянутой руки от человека и до бесконечности, то необходимо построение гораздо большего количества планов-изображений.

Второй недостаток в данном способе построения изображения вытекает из-за непреклонного правила; для того, чтобы построить один план-изображение, требуется один микродисплей (т.е. для построения бипланового дисплея требуется 4 микродисплея, по 2 на каждый глаз), что существенно увеличивает стоимость такого варианта построения объемного изображения.

С целью выявления соответствия дисплея естественному зрительному восприятию были проведены соответствующие эксперименты (см. фотографии рис.7). На рис. 7а фокус фотоаппарата выставлен на 1м, соответственно на полученной фотографии объекты, на переднем плане, резкие, а на заднем плане размыты. На рис. 7б фотоаппарат сфокусирован на бесконечность, соответственно объекты ближнего плана размыты, а объекты заднего плана имеют четкий контур. Из полученных фотографий можно сделать обоснованный вывод, что разработанный 3D дисплей формирует стимулы аккомодации для глаза.



Рисунок 7 – Изображения полученные фотоаппаратом с одного окуляра

В **пятой** главе описывается серия экспериментов проведенных для оценки вероятного влияния устройства просмотра, в нашем случае мультифокального 3D дисплея, на визуальное восприятие пользователя, особенно в оценке глубины и размеров объектов. Существенными характеристиками визуального восприятия глубины объектов являются размер и расстояние, которые связаны между собой. На разработанном в КТИ НП СО РАН совместно с НФ ИФП СО РАН «КТИ ПМ» и ООО «Софтлаб-НСК» стереоскопическом дисплее с бифокальными окулярами, содержащими 4 микродисплейные матрицы на органических светодиодах, изображения которых комбинируются с помощью светоделительного кубика проводилась серия экспериментов Холуэя и Боринга доказавшие, что в восприятии признаков расстояния решающая роль принадлежит константности восприятия размера. Эксперимент А. Холуэя и Э. Боринга: зависимость между величиной переменного стимула и удаленностью эталонного стимула. Константность восприятия размера объекта зависит от точности оценки наблюдателем удаленности до этого объекта.

При проведении эксперимента испытуемый сидел на пересечении двух коридоров. В первом коридоре на расстоянии 2 м от испытуемого располагался переменный стимул — световое пятно, размер которого испытуемый мог регулировать. Во втором коридоре на расстояниях от испытуемого (от 3 до 36 м) предъявлялся эталонный стимул – световое пятно, реальные размеры которого менялись вместе с расстоянием так, что пятно всегда имело один и тот же угловой размер, т.е. размер сетчаточного образа был всякий раз одинаковым (чем ближе было пятно к испытуемому, тем меньше были его размеры).

Перед испытуемым стояла задача подобрать размер переменного стимула так, чтобы он казался равным эталону. Предлагалось несколько вариантов предъявления:

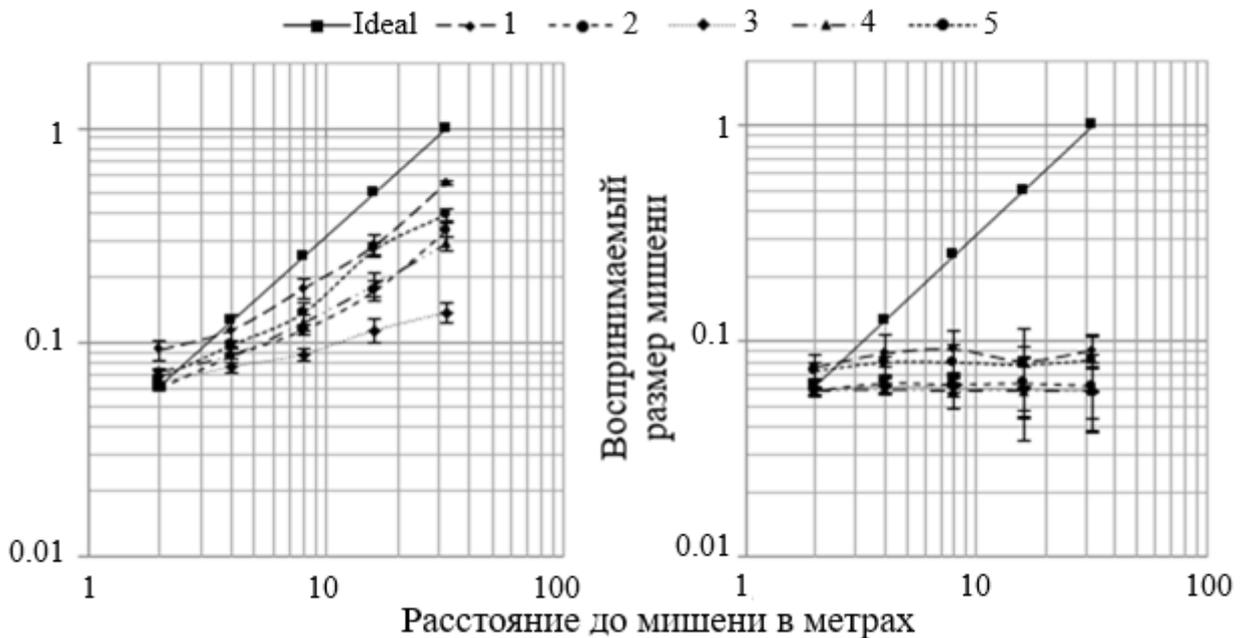
1) условия бинокулярного зрения (можно двигать головой; освещение нормальное); 2) монокулярное наблюдение (один глаз закрыт; можно двигать головой; освещение нормальное). Это исключает все бинокулярные признаки, например, диспаратность; 3) затемненное помещение.

На рисунке 8 представлен первый коридор, в котором перемещалась мишень, и второй коридор с мишенью, размер которой испытуемый должен был выставить исходя из своего восприятия размера мишени в первом коридоре.

По результатам экспериментов с пятью испытуемыми, были построены следующие графики зависимостей воспринимаемого размера мишени от расстояния до мишени (рис. 9). Измерения каждым испытуемым проводились по 5 раз, результаты усреднялись и на графиках отмечался так же разброс полученных значений.



Рисунок 8– Сформированное коридорное пространство с мишенями: а) коридор с эталонным стимулом – мишенью, размеры которой меняются с расстоянием; б) коридор с переменным стимулом – мишенью, размер которой испытуемый мог регулировать.



а) хорошая освещенность

б) полная темнота

Рисунок 9 – Графики зависимости воспринимаемого наблюдателем размера мишени от расстояния до нее, при постоянном угловом размере мишени в различных условиях

На рис. 9а представлен график, полученный по результатам, снятым в условиях хорошей освещенности пространства, а также при постоянном угловом размере мишени. Линией «Ideal» показано фактическое изменение размера мишени, в зависимости от расстояния, на которое она отнесена от наблюдателя. Испытуемый выставлял размер мишени, находящейся во втором коридоре, в соответствии с размером мишени, которую он наблюдал в первом коридоре.

Мишень удалялась на расстояние 2, 4, 8, 16, 32 метра. Размер мишени изменялся, но при этом угловой размер ее оставался постоянным. По кривым 1-5 видно, как наблюдатели фиксировали увеличение объекта в размерах (это объясняется тем, что наблюдатель в условиях хорошей освещенности есть с чем визуально сравнивать размеры мишени, т.е. относительно кресел, дверей, ламп освещения). На рис. 9б представлен график, в отличие от первого случая, полученный по результатам, снятым в условиях темноты, но также с постоянным угловым размером мишени. По кривым 1-5 видно, как наблюдатели фиксировали постоянство объекта в размерах. Это объясняется тем, что в отсутствие освещенности они не имели возможности визуально сравнивать размеры мишени с предметами, расположенными в коридоре, и основывались лишь на своих оценках размеров мишени, спроецированной на сетчатку глаза.

Данные серии экспериментов также повторялись в монокулярном режиме. В этом случае результаты во многом повторялись с измерениями проведенными ранее в бинокулярном режиме. Испытуемые отмечали, что изображение оставалось объемным, и они отчетливо ощущали перемещение мишени по глубине. Это существенно отличает мультифокальные 3D дисплеи от стереоскопических. Результаты эксперимента показали, что константность восприятия величины объекта наблюдается в том случае, когда присутствует надежная информация о его удалённости. При исключении этой информации восприятие становится аконстантным и основывается на угловых размерах объекта. Проведенная серия экспериментов показывает, что мультифокальные 3D дисплеи предоставляют достаточно надежную информацию об удаленности и размерах предметов, что позволяет не нарушать закона константности восприятия установленного Холуэем и Борингом в 1941 году. Воспринимаемый размер объектов зависит от размера изображения на сетчатке глаза, а также от проксимальных сигналов для глубины. Значение угла обзора в качестве сигнала для размера и расстояния усиливается, когда доступность других сигналов уменьшается. В нашем эксперименте данный эффект наблюдался при выключении света в коридоре. Это обеспечивает четкую теоретическую основу для понимания вероятного влияния 3D мультифокальных дисплеев на пространственное восприятие человека. Способность человека воспринимать глубину пространства является результатом множества перекрывающихся сигналов из окружающей среды, и, таким образом, является сложным процессом. И хотя закон постоянства размеров гласит, что физический размер объекта правильно воспринимается независимо от его расстояния от наблюдателя или размера изображения, которое он проецирует на сетчатку, тем не менее, эта связь сохраняется только тогда, когда доступна достаточная информация о пространственной глубине. Существуют факторы, которые

ухудшают восприятие глубины через 3D дисплей по сравнению с невооруженным зрением, включающие в себя снижение остроты зрения, контрастную чувствительность, стереопсис и малый угол поля зрения, а также, вероятно, другие факторы, связанные с особенностями формирования изображений. В дальнейшем исследование необходимо быть распространено на естественные условия, более широкий диапазон расстояний и иметь полную картину атрибутов окружающей среды, которые могут влиять на суждения человека о глубине отображаемого пространства и размерах предметов.

В приложении А представлен акт о внедрении результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены патентно-информационные исследования по проблеме. Построена концептуальная модель систем коллективного пользования и взаимодействия в трехмерной виртуальной среде с добавленной физической реальностью. Исследованы пути создания визуально комфортных стереоскопических наголовных дисплеев, стимулирующих аккомодацию глаз.

Рассчитаны коэффициенты, необходимые для корректировки функции комбинации планов изображений, с целью повышения контраста объемного изображения и повышения линейности стимула аккомодации для зрачков глаза диаметром 2,7-3,3мм.

Предложены и исследованы уникальные методы повышения качества формируемого пространства в мультифокальных системах объемного отображения визуальной информации, влияющие на достоверность отображаемого объемного пространства для оператора.

На основе полученных способов формирования объемного изображения разработан экспериментальный стереоскопический дисплей с бифокальными окулярами с согласованными дистальными стимулами глубины – конвергенции и аккомодации глаз.

Выполнен анализ влияния устройства просмотра – мультифокального 3D дисплея на визуальное восприятие пользователя в оценке глубины и размеров объектов. В качестве модели эксперимента выбрана методика Холуэя и Боринга, доказавшая, что в восприятии признаков расстояния решающая роль принадлежит константности восприятия размера. Проведенная серия экспериментов показывает, что мультифокальные 3D дисплеи предоставляют достаточно надежную информацию об удаленности и размерах предметов, что позволяет не нарушать закона константности восприятия.

В целом проект рассматривает оптико-информационную систему коллаборации на основе ретрорефлективной стереоскопической виртуальной

среды с добавленной физической реальностью (физическими лицами). В рамках проекта предложены способы создания трёхмерных визуально комфортных наголовных дисплеев, в том числе проекционных для ретрорефлективной виртуальной среды. Решен ряд проблем по созданию такого типа дисплеев, а также определены компоненты технологии восприятия добавленной реальности. Рассчитаны несколько вариантов оптического исполнения мультифокальных трехмерных дисплеев.

В перспективе планируется применение такого типа дисплеев при разработке тренажеров нового поколения для космонавтов и авиатренажерах, а также для дистанционного управления транспортными средствами и манипуляторами. Такие дисплеи позволяют оператору правильно оценивать реальное расстояние и размер объектов, что позволяющих операторам управлять их машиной в течение длительного времени и при этом не испытывать визуального дискомфорта.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и приравненных к ним:

1. Власов Е.В., Завьялов П.С., Жимулева Е.С. Расчет и оценка широкоугольных окуляров с высоким разрешением для трехмерного мультифокального наголовного дисплея // Фотоника. - 2024. - Т. 18. - №7. - С. 564-568.

2. Власов Е.В., Бартош В.С., Кузиковский С.А. Визуальное восприятие пространства в мультифокальных трехмерных дисплеях, стимулирующих аккомодацию. // Автометрия. – 2020. –Т.56 –№ 1. – С. 39-45.

Переводная версии журнала входит в базу данных WoS и Scopus:

Vlasov E.V., Bartosh V.S. & Kuzikovskii S.A. Visual Perception of Space in Multifocal Three-Dimensional Displays Stimulating Accommodation. Optoelectron. Instrument. Proc. 56, 33–38 (2020).

3. Власов Е.В. Способы повышения контраста комбинированных изображений и линейности стимула аккомодации глаза в мультифокальных трехмерных дисплеях // Автометрия. – 2018. –№ 3. – С. 78-84.

Переводная версии журнала входит в базу данных WoS и Scopus:

Vlasov. E.V. (2018). Methods of improving the contrast of combined images and the linearity of the eye accommodation stimulus in multifocal three-dimensional displays. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 54(3), 277-283.

4. Е.В. Власов «О повышении контраста комбинированных изображений в трехмерных мультифокальных дисплеях» // Журнал «Приборы» - 2017 - №9– С. 34-38.

5. Е.В. Власов, В.И. Патерикин «Оптико-информационные системы коллаборации на основе объемной виртуальной среды и физической реальности» // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 972-975.

Переводная версии журнала входит в базу данных WoS и Scopus:

Vlasov E.V., Paterikin V.I. (2016). Optical information collaboration systems based on the volumetric virtual environment and the physical reality. Computer Optics, 40(6), 972-975.

6. В.С. Бартош, Е.В. Власов, М.М. Лаврентьев «Многоплановые 3d-дисплеи для дистанционного управления транспортными средствами и манипуляторами» // Журнал «Приборы» - 2016 - №11– С. 31-37.

7. Власов Е.В., Ковалев А.М. 3D Дисплей с согласованными стимулами аккомодации и конвергенции // Журнал «Приборы». 2014. №12(174). – С. 28-30.

8. Ковалев А.М., Власов Е.В. Дифракционная глубина 3D изображений, стимулирующих аккомодацию глаза // Автометрия. 2014. 50, №1. С. 3-8

Переводная версии журнала входит в базу данных WoS и Scopus:

Kovalev A.M., Vlasov E.V. (2014). Diffraction depth of three-dimensional images stimulating eye accommodation. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 50(1), 1-5. doi:10.3103/S8756699014010014

9. «О качестве трехмерного изображения, стимулирующего аккомодацию глаза» / А.М. Ковалев, Е.В. Власов // Автометрия. – 2012. – Т.48. – № 4. – С. 33-40.

Переводная версии журнала входит в базу данных WoS и Scopus:

Kovalev A.M., Vlasov E.V. (2012). Quality of a three-dimensional image stimulating eye accommodation. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 48(4), 351-357.

Патент на изобретение в РФ:

10. Патент на изобретение №2609285 "Способ формирования многопланового изображения и мультифокальный стереоскопический дисплей", Бартош В.С., Белого И.В., Власов Е.В., Кравченко Ю.Л., Огородников Д.В., приоритет 05.11.2015 г., дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 01.02.2017.

Результаты диссертационных исследований докладывались на международных и всероссийских научных конференциях:

11. Ковалев А.М., Кравченко Ю.Л., Хрящев С.В., Елыков Н.А., Власов Е.В., Морозов А.О. Бифокальный объемный стереоскопический дисплей //Гео-Сибирь-2011. Т.5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч1. Сборник материалов VII Международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2011», 19-29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 94-97.

12. А.М. Ковалев, Е.В. Власов, Н.А. Елыков, В.С. Бартош. Мультифокальный стереоскопический дисплей // Космический Форум 2011, посвященный 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина (Устный). Пилотируемые полеты в космос. Биомедицина и жизнеобеспечение. Сборник материалов Космического форума 2011, 18-21 октября 2011 Звездный городок, 2011. - С. 71-72.

13. А.М. Ковалев, Е.В. Власов. Биплановое изображение, стимулирующее аккомодацию глаза // Интерэкспо Гео-Сибирь-2012. Т.1. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Сборник материалов VIII Международного научного конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь-2012», 10-20 апреля 2012 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 75-79.

14. Власов Е.В., Ковалев А.М. О контрасте комбинированных изображений в 3D дисплеях, стимулирующих аккомодацию глаза// Интерэкспо Гео-Сибирь-2014. Т.1. Сборник материалов Международного научного конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь-2014», 8-18 апреля 2014 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 45-48.

15. Власов Е.В. О способах построения многоплановых изображений в 3d-дисплеях// Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – С. 76-79.

16. Е.В. Власов, В.И. Патерикин «Просветные 3d мультифокальные дисплеи на основе объемной виртуальной среды с добавленной физической реальностью» //Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 116-119.

17. Е.В. Власов, В.И. Патерикин «Индивидуальные средства навигации, ориентации и контроля для оптико–информационной системы наголовных дисплеев наблюдателей» Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 125-129.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20 тел./факс. (383) 346-08-57

Формат 60×84/16, объем 1.25 п.л., тираж 100 экз.

Заказ №188, подписано в печать 23 декабря 2025 г.