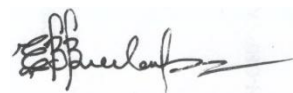


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук

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»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор Юрий Васильевич Чугуй

кандидат технических наук, Марина Андреевна Завьялова

Новосибирск – 2025

Оглавление

Введение	4
Глава 1 Исследование способов построения дисплеев для виртуальных сред с добавленной реальностью	14
1.1 Основы формирования трехмерного изображения	14
1.2 Ретрорефлективная виртуальная среда.....	21
1.3 Иммерсивная виртуальная среда.....	23
1.4 Просветная виртуальная среда	27
Выводы главы 1	30
Глава 2 Анализ распределения аксиальной интенсивности изображений	33
2.1 Оптическая схема наголовного дисплея с использованием модели глаза и заданные сигналы.....	33
2.2 Проведение дифракционного анализа изображения	35
2.3 Определение дифракционной глубины фокуса	39
Выводы главы 2	41
Глава 3 Улучшение качества трехмерной картины при комбинировании планов-изображений.....	43
3.1 Повышение контраста	46
3.2 Выравнивание стимула аккомодации	50
Выводы главы 3	56
Глава 4 Исследование способов формирования трехмерного изображения с добавленной аккомодацией.....	57
4.1 Светоделительные элементы	57
4.2 Активные оптические элементы.....	60
4.3 Вращатели поляризации, двулучепреломляющие кристаллы	63
4.4 Расчет схем поляризационных проекционных наголовных дисплеев	66
4.4 Уменьшение светопотерь и увеличение углов поля зрения в многоплановых 3D дисплеях	72
Выводы главы 4.....	77
Глава 5 Экспериментальное исследование визуального восприятия пространства человеком в мультифокальных 3D дисплеях	78
5.1 Формирование константности зрительного восприятия у наблюдателя	79

5.2 Описание разработанного мультифокального 3D дисплея	80
5.3 Методика и результаты экспериментальных исследований.	86
Выводы главы 5	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
Список литературы	98
Приложение А Акт внедрения	103

Введение

Актуальность

Восприятие расстояния человеком основывается на признаках глубины. Прямые признаки глубины стимулируют близкую к корректной аккомодацию глаз, их конвергенцию и стереоскопическую диспаратность (рассогласование изображения для формирования стереопары). Косвенные признаки включают в себя окклюзии (части сцен изображения, видимые только одним глазом наблюдателя), многовариантную перспективу, изменение контраста и градиента структуры, двигательный параллакс и др. [1-6].

Как правило, в тренажерах применяются имитационные решения для полного погружения в виртуальную среду. При этом при использовании традиционных дисплеев прививаются недопустимые ложные навыки, так как нужные стимулы аккомодации отсутствуют. Более того продолжительное использование традиционных стерео дисплеев (более получаса) создает опасность для зрения.

При разработке стереоскопических дисплеев, не вызывающих ощущения дискомфорта при восприятии объёмных изображений, основная сложность состоит в создании и согласовании стимулов аккомодации и конвергенции глаз [7-9]. По сути, наличие стимулов аккомодации означает, что изображение каждой из стереопар должно быть трехмерным, т.е. иметь протяженность по глубине для каждого элемента изображения (пиксела). Такое мультифокальное изображение, а точнее его контрастность на сетчатке (субъективно воспринимаемая как чёткость, или резкость), является стимулом для аккомодации глаза. Информацию о наличии такого изображения фиксируют соответствующие нейроны проекционной зоны коры, связанные с глазодвигательным ядром (Эдингера-Вестфаля) ствола мозга. Аксоны (предганглионарные парасимпатические волокна) нейронов этого ядра в составе глазодвигательного нерва идут к цилиарному ганглию (ресничному узлу),

расположенному позади глаза. Постганглионарные волокна ресничного узла в составе коротких ресничных нервов направляются к цилиарной мышце, которая уже обеспечивает аккомодацию (по Геймгольцу) глаза [10-12]. Правильным образом сформированное мультифокальное пространство предоставит основы для применения стереодисплеев в перспективных системах управления различными транспортными системами и тренажерах нового поколения. Повышение качества формируемого пространства позволит увеличить продолжительность работы и позволит эффективно применять эту технологию для:

- операторов дистанционных роботизированных комплексов, которая основана на наблюдении получаемого видео от камер, установленных на робототехнический комплекс (РТК) для выбора маршрута движения и управления РТК. Для дистанционного погружения в реальную среду целесообразно использовать наголовные мультифокальные стерео дисплеи;
- операторов широкого ряда оптических инструментов: бороскопов, дефектоскопов, телескопов, эндоскопов, микроскопов.

Данная работа посвящена исследованию и разработке методов, повышающих качество формируемого пространства, основанного на мультифокально стереоскопических принципах построения объемного изображения. Результаты работы планируется применять для устранения аккомодационно-конвергентного конфликта, возникающего при построении 3D картины в простых стереоскопических системах.

Степень разработанности проблемы

В 2004 г. фирма LightSpace Technologies Inc. впервые продемонстрировала твердотельный объёмный дисплей DepthCube Z1024 [13], содержащий пакет из 20 светорассеивающих пластин-модуляторов, управляемых оптоэлектронным способом. Отображающая среда представляет параллелепипед с размерами:

40 см (ширина) × 30 см (высота) × 10 см (глубина), в котором содержится 15.3×10^6 цветных элементов изображения – вокселей.

И. Компанец (ФИАН, 2005 г.) предложил объёмный «экран» в виде куба с ребром 30 см, который вмещает пакет из 100 пластин [14]. Преимущество объёмных дисплеев заключается в полном отсутствии визуального дискомфорта, потому что воксели являются одновременно стимулами аккомодации и конвергенции для множества наблюдателей. К недостаткам наряду с другими следует отнести слишком малый объём глубины, определяемый физическими размерами (10-30 см), и низкую частоту обновления кадров (~20 Гц).

J.Rolland (2000 г.) предложила идею построения мультифокального наголовного дисплея [15]. Гипотетический трёхмерный микродисплей располагается в фокальной области окуляра, который увеличивает микроизображения и переносит их в пространство перед наблюдателем, создавая мнимое объёмное изображение. Это дисплей персонального пользования с единственной точкой наблюдения, что позволяет корректно отображать интерпозицию предметов (окклюзии), светотени и блики. Кроме того, уменьшается число планов и увеличивается объём аккомодации. Расчёты на основе геометрической оптики показали, что для объёма аккомодации 2 дптр (от 50 см до ∞) необходимо 14 планов, а расстояние между планами ~ 0,14 дптр. К недостатку следует отнести слишком большое количество необходимых планов, что приводит к трудностям при промышленном изготовлении устройства.

В 2003 г. получен патент РФ (ИАиЭ СО РАН, А. Ковалев) на мультифокальный стереодисплей на основе многофокусного окуляра [16], содержащего два сферических зеркала, каждое из которых может иметь два отражающих слоя. Объём аккомодации составляет около 2 дптр.

К.Akeley et al. (2004 г.) исследовали прототип стереодисплея с двумя каналами – для левого и правого глаза [17]. В каждом из каналов используется три плана-изображения, разнесенные по глубине, комбинирование которых производится с использованием светоделителей. Объём аккомодации составляет

1,34 дптр. Основные способы, использованные в работе и позволяющие уменьшить число планов и при этом сохранить глубину фокусировки, это фильтрация и интерполяция интенсивности изображений по глубине между соседними планами. G.Love et al. (2009 г.) рассмотрели вариант мультифокального стереодисплея с интерполяцией глубины, в котором создаётся 4 фокуса на глаз с помощью «быстропереключаемых» линз, выполненных из кальцита (двойное лучепреломление). Достигнутая глубина фокусировки составила 1,8-2,3 дптр [18].

Для коллегиального решения задач множеством наблюдателей развивается новое направление – проекционные стереоскопические наголовные дисплеи индивидуального пользования, работающие с ретрорефлективными экранами коллективного пользования (Hong Hua et al. 2008 -2024 г.). При этом методы построения изображения для каждого из пользователей основаны на формировании многоплановых изображений [19-22].

При разработке мультифокальных стереодисплеев необходимо учитывать ряд особенностей, влияющих на соответствие формируемого пространства естественному зрительному восприятию. В настоящее время существует различные способы, позволяющие создавать множество планов изображений и их комбинирования. Однако не существует критериев оценки таких важных и существенных факторов как распределение интенсивности изображений и дифракционной глубины пространства. А также проведен лишь небольшой ряд исследований 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.

Связь с государственными программами и НИР

Основная часть работы выполнена в рамках научно-исследовательских работ КТИ ИП СО РАН:

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

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.

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

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

1. Сформировать критерии комбинирования планов изображений для формирования мультифокального объёмного 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 объёмного 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 объёмного 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 Давида 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 наблюдателя, 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. Предложены схемы поляризационных проекционных наголовных дисплеев, а так же решена

задача светопотерь такого типа дисплеев, предложен способ увеличения углов поля зрения в мультифокальных трехмерных дисплеях. 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 предложены способы формирования мультифокального стереоизображения для управляющего компьютера с учетом психофизических свойств человеческого зрения, разработан и изготовлен оптический блок мультифокального дисплея.

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 результатов

Основные результаты работы докладывались на международных научных конгрессах «ГЕО-Сибирь» в 2011, 2012, 2014, 2015, 2017 гг. (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 2016-2020 гг.

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 05.11.2015 г., 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 литературы из 63 наименований, одного приложения содержит 103 страницы основного текста, 59 рисунков.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность основоположателю данной тематики д.т.н. А. М. Ковалеву за наставничество и объемное погружение в исследование восприятия человеком трехмерного пространства, научному руководителю – проф., д.т.н. Ю. В. Чугую за постоянное внимание, содействие и ценные обсуждения. Автор пользуется случаем выразить глубокую признательность к.т.н. П. С. Завьялову за необходимые консультации по тематике работы, помощь в оптических расчетах и полезные советы, а также к.т.н. Л.В. Финогенову за поддержку на всех этапах выполнения работы. Автор благодарен Травиной И. А., Бартошу В. С. и ООО «СофтЛаб-НСК» за проявленный интерес к работе, полезные замечания, разработку программного обеспечения. Автор благодарит Завьялову М. А. за самоотверженную готовность взять на себя руководство диссертацией и погрузиться в данную тематику. А также выражает особое спасибо сотрудникам лаборатории № 1-1 КТИ НП СО РАН, за их профессионализм, доброжелательность и готовность оказать помощь, за создание благоприятных условий для продуктивной работы над проектом. Без вашего вклада эта диссертация была бы невозможна.

Глава 1 Исследование способов построения дисплеев для виртуальных сред с добавленной реальностью

В настоящем разделе 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, основанные на указанных методах. Показаны их достоинства и недостатки.

1.1 Основы формирования трехмерного изображения

В основе трехмерного кино и телевидения, а так же компьютерных 3D дисплеев лежит принцип работы стереоскопа Уитстоуна (1838 г.). Предложенное им устройство для просмотра стереоскопических изображений основано на использовании пары частично затененных фотографий, которые отображают одну и ту же сцену с незначительным сдвигом. При просмотре изображений через стереоскоп каждый глаз видит только одну из фотографий, что создает эффект трехмерности и глубины. Этот эффект достигается за счет пересечения зрительных осей глаз при просмотре изображений под разными углами. Диспаратность образов, проецируемых стереопарами на сетчатки глаз, инициирует особое восприятие глубины и объема, называемое стереоскопическим зрением, или стереопсисом. Хотя стереоскоп Уитстоуна был создан задолго до появления современных технологий виртуальной реальности и трехмерной графики, его принцип работы все еще используется в различных областях для создания трехмерного эффекта при просмотре изображений.

Производители выпускают несколько типов дисплеев, позволяющих увидеть 3D изображение. Их методы работы описаны ниже.

Стереоскопический метод формирования 3D изображения основан на принципе получения трехмерного эффекта за счет использования двух различных изображений, которые воспринимаются каждым глазом по отдельности. При получении изображений обычно используются две камеры или две объективные системы, расположенные на определенном расстоянии друг от друга, чтобы захватить изображение с различными углами обзора. При просмотре стереоскопических изображений через специальные очки или устройства, каждому глазу показывается свое изображение, что создает ощущение глубины и объемности. Мозг объединяет два изображения в одно трехмерное, что позволяет воспринимать объекты как будто они находятся на разных плоскостях. Метод включает в себя различные принципы получения и представления изображений:

Анаглифический — левые и правые изображения проецируются на один экран двумя проекторами. Один проектор при этом снабжается синим светофильтром, другой — красным. Зрители смотрят кино в очках, с такими же красно-синими фильтрами, но поставленными в обратной последовательности. В результате происходит вычитание одного цвета другим, и достигается разделение изображений.

Временной селекции — используется в современном 3D телевидении. При этой технологии попеременно чередуются кадры для глаз зрителя. Общая частота при этом составляет 48 кадров в секунду, но каждый глаз видит только привычные 24 кадра. Достигается это с помощью специального фильтрующего устройства, а также при помощи очков со специальными светофильтрами. Таким образом, информация, поступающая в мозг от двух глаз, получается рассинхронизированной — никогда ранее глазам и мозгу человека не приходилось воспринимать и обрабатывать такую необычную информацию.

Поляризационный — в 3D технологии поляризационного разделения два изображения разделяются с помощью поляризации света (линейная поляризация

или круговая поляризация). Они проецируются на специальный экран (3D серебряный экран), не меняющий поляризации падающего света. Направления поляризации фильтров подобраны таким образом, что каждый глаз видит только предназначенное для него изображение. 3D технология поляризационного разделения применяется в проекционных 3D EVENT системах, специальных мониторах, 3D кинотеатрах. Преимущества 3D поляризационной технологии: высокое качество 3D эффекта, возможность использовать проекционные системы для большого числа зрителей, наиболее комфортное решение для длительного просмотра 3D стерео. Недостатки стереоскопической технологии поляризационного разделения: незначительные несовершенства при разделении изображений из-за рассеивающих свойств экрана, 3D оборудование для стереоскопической технологии требует места для размещения, сложность установки и настройки оборудования, специальный 3D экран. Применение: в 3D кинотеатрах, для массовых 3D показов, шоу, выставок и мероприятий, для науки и образования; для сложных проектов.

Пространственный — в данной 3D технологии используются видеоочки с поддержкой 3D - это специальные видео устройства, которые надеваются на голову. В данной стереотехнологии изображение для левого и правого глаза выводится на два LCD дисплея, размещенных прямо перед каждым глазом зрителя на близком расстоянии. LCD дисплеи имеют маленький размер и невысокое разрешение, но с близкого расстояния эти дисплеи выглядят как большой кинотеатральный экран. Преимущества 3D технологии, использующей видео очки: компактность стереосистемы, отключение от окружающей реальности, невысокая цена (для среднего разрешения 3D видео очков). Недостатки 3D технологии: невысокое разрешение, ограничение применения данной 3D технологии, недостаточная поддержка, высокая стоимость (для высокого разрешения стерео дисплеев).

Автостереоскопический метод основан на принципе формирования трехмерных изображений без необходимости использования специальных очков

или устройств. Этот метод использует оптические технологии, которые позволяют различным глазам видеть разные изображения с различными углами обзора. Одна из самых распространенных технологий в автостереоскопии - это использование линз и барьеров, которые направляют различные части изображения к разным глазам. Это создает эффект глубины и трехмерности без необходимости использования специальных очков. Другие подходы включают использование параллаксных барьеров, объемных дисплеев и других технологий, которые создают множество точек зрения для глаз зрителя, что позволяет им видеть 3D эффект без дополнительных устройств. Автостереоскопия имеет потенциал для широкого применения в области рекламы, игровой индустрии, медицинских приложений и других отраслях, где требуется создание трехмерных изображений без использования специальных очков.

Голографические методы — это методы записи и воспроизведения трехмерных изображений с использованием интерференционных и фазовых свойств света. Принцип работы голографического метода формирования 3D заключается в создании голограммы, которая представляет собой запись интерференционного образа, содержащего информацию о форме, глубине и цвете объекта. Для создания голограммы используется лазерный свет, который разделяется на два пучка: опорный и объектный. Опорный пучок направляется прямо на фотопластину, в то время как объектный пучок отражается от объекта и затем пересекается с опорным пучком на фотопластине. При этом происходит интерференция света, что создает сложный узор в виде голограммы. В процессе воспроизведения голограммы, лазерный свет используется для воссоздания волны, которая в точности соответствует той, которой была произведена запись голограммы. Это позволяет воспроизвести трехмерное изображение объекта с высокой степенью детализации и глубины. Голографический метод формирования 3D широко используется в различных областях, таких как искусство, научные и инженерные приложения, медицинская диагностика, и

развлекательная индустрия, где требуется высокое качество трехмерной визуализации.

Воксельный метод построения 3D картины основан на использовании объемных элементов, называемых "вокселями", для представления трехмерных объектов и сцен. В отличие от пикселей, которые представляют двумерные изображения, воксели позволяют представлять трехмерные данные в объеме. Процесс построения 3D картины с использованием воксельного метода включает в себя разделение трехмерного пространства на множество маленьких объемных элементов. Каждый воксель содержит информацию о своих пространственных координатах, цвете, прозрачности и других характеристиках объекта. Для создания трехмерных изображений, используются различные технологии, такие как объемная проекция, светодиодные массивы, лазерные дисплеи и другие способы. Каждый воксель также может управляться индивидуально, что позволяет создавать сложные трехмерные сцены и анимацию. Эта технология представляет собой эффективный способ визуализации трехмерной информации и находит применение в различных областях, включая медицинскую диагностику, научные и инженерные приложения, развлечения и другие отрасли, где требуется работа с трехмерными данными.

Описанные методы построения 3D дисплеев используются для формирования виртуальной среды. Виртуальные пространства разнообразны и включают в себя различные типы, предназначенные для различных целей. Ниже приведены некоторые основные типы виртуальных сред:

Виртуальная реальность (VR) — это технология, которая создает иммерсивное виртуальное пространство, погружая пользователя в симулированную среду, которая может быть вымышленной или моделировать реальные места. VR обычно достигается с использованием гарнитуры виртуальной реальности (VR-очки), которая выводит изображения и звук, а также позволяет пользователю взаимодействовать с окружением. Технология VR позволяет пользователям переживать и взаимодействовать со средой, которая

может быть совершенно отличной от реальной. Это использование трехмерных изображений, звука и других сенсорных вводов, чтобы создать ощущение присутствия в другом месте. Пользователь может перемещаться, взаимодействовать с объектами и даже переживать различные события в виртуальной среде. Применения виртуальной реальности включают игры, обучение, тренинги, визуализацию данных, медицинскую диагностику и лечение, инженерное моделирование, развлекательные и туристические приложения. VR также позволяет людям переживать искусство и культурные события в новом контексте. Технология VR постоянно развивается, и ее применение становится все более широким и разнообразным, предлагая новые возможности для виртуального восприятия и взаимодействия с информацией и окружением.

Дополненная реальность (AR) — это технология, которая позволяет добавлять виртуальные объекты и информацию в реальное окружение, обогащая его дополнительными данными. В отличие от виртуальной реальности (VR), которая погружает пользователя в совершенно виртуальное пространство, AR сохраняет реальную среду, но добавляет к ней дополнительные компьютерно-сгенерированные элементы. Примеры использования AR включают различные мобильные приложения, которые могут дополнить изображения из камеры смартфона в реальном времени виртуальными объектами, информацией или эффектами. Такие приложения могут использоваться для расширения информации о реальных объектах, обогащения образовательного опыта, улучшения интерактивности с миром и создания увлекательных развлекательных возможностей. В более сложных системах, AR может быть использована в промышленности для создания инструкций по сборке, обслуживанию и ремонту механических устройств, а также для обучения и виртуальной навигации в реальном окружении. AR также находит применение в медицине, дизайне и других отраслях. Одним из примеров успешной реализации AR является игра Pokemon Go, которая использует камеру смартфона для

добавления виртуальных персонажей и элементов игры в реальное окружение, позволяя игрокам взаимодействовать с ними в реальном мире.

Смешанная реальность (MR) — это технология, которая объединяет элементы виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR), позволяя виртуальным объектам взаимодействовать с реальным окружением и наоборот. MR создает гибридное пространство, в котором виртуальные объекты и реальные объекты существуют в одной среде и могут взаимодействовать друг с другом. В отличие от AR, где виртуальные объекты просто добавляются к реальной среде, MR позволяет этим объектам реагировать и взаимодействовать с реальным миром. Это можно использовать для создания уникальных интерактивных опытов, где пользователи могут взаимодействовать с виртуальными объектами в реальном мире и видеть их реагировать на окружение. Примеры применения смешанной реальности включают тренировочные симуляторы, где виртуальные объекты могут быть интегрированы в реальные сценарии обучения, а также в сфере инжиниринга, где виртуальные модели могут взаимодействовать с физическими объектами в реальном мире для моделирования и анализа процессов. Технология смешанной реальности предлагает множество перспектив в области обучения, обслуживания, развлечений, медицины и проектирования, где объединение виртуальных и реальных объектов может создать новые возможности и опыты для пользователя.

Каждый тип виртуальной среды имеет свои уникальные особенности и приложения, и все они играют важную роль в различных областях, таких как развлечения, образование, медицина, инженерные и научные исследования. Далее приводятся несколько примеров дисплеев, построенных на описанных выше методах и технологиях.

1.2 Ретрорефлективная виртуальная среда

Виртуальная среда SCAPE (Stereoscopic Collaboration in Augmented and Projective Environments) оптического колледжа университета Аризоны в Туксоне [23] разработана как развитие идеи виртуальной комнаты CAVE (Cave Automatic Virtual Environment), предложенной лабораторией электронной визуализации университета Иллинойс в Чикаго в 1992 г. [24]. SCAPE «размещается» в комнате $3,6 \times 3,6 \times 2,7$ м³, стены которой оклеены ретрорефлективным материалом, отражающим падающий свет. Посередине комнаты установлен рабочий стол с ретрорефлективным покрытием размером $1,5 \times 0,9$ м². Каждый пользователь снабжен наголовным дисплеем (рис.1), который позволяет видеть пространство в собственной перспективе согласно своему положению и направлению взгляда. Разные пользователи видят неискаженно виртуальные предметы, а поэтому могут работать с ними совместно. Кроме того, они видят друг друга, реальные предметы на рабочем столе и могут общаться.

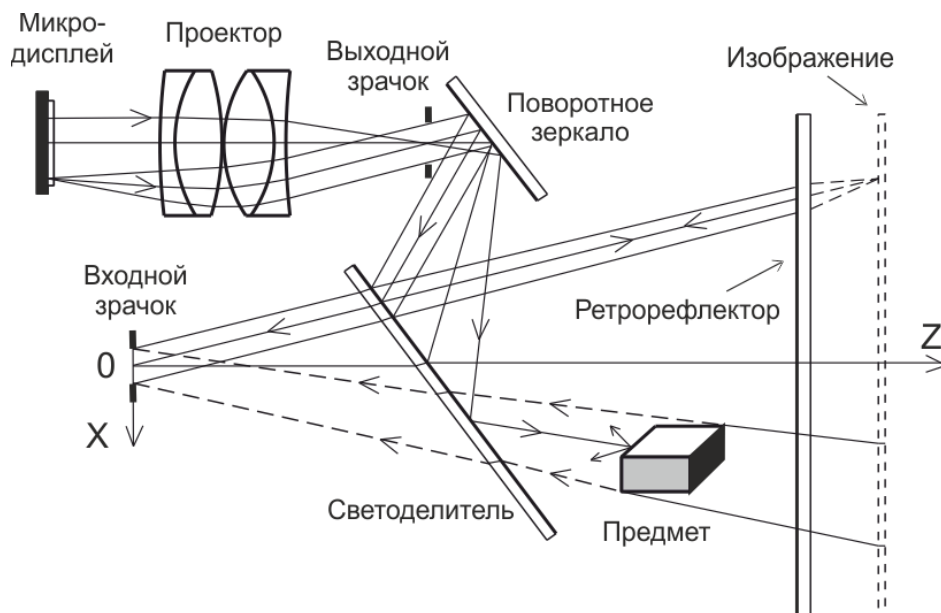


Рисунок 1 – Ретрорефлективный наголовный дисплей

Наголовный дисплей содержит микродисплей для воспроизведения виртуальной сцены, проекционный объектив, поворотное зеркало

(необязательно) и светоделительную пластину, ориентированную таким образом, чтобы выходной зрачок объектива и входной зрачок глаза были зеркальным отражением друг друга. В этом случае свет проецируется на стенки комнаты как бы из глаза наблюдателя и возвращается обратно в глаз после ретрорефлективного отражения. Действительное изображение виртуальных предметов фокусируется на некотором «воздушном» экране в соответствии с фокусным расстоянием объектива и положением микродисплея на оптической оси.

Поскольку светоделительная пластина полупрозрачна, наблюдатель легко видит реальные предметы, расположенные перед ретрорефлектором. Если предмет непрозрачен, то затеняются все виртуальные предметы, расположенные за этим предметом. Таким образом, выполняется корректная самостоятельная окклюзия, но сам предмет оказывается подсвеченным этими затенёнными виртуальными предметами. И это один из недостатков схемы. Другой недостаток состоит в том, что если возникает необходимость отобразить виртуальный предмет перед реальным, необходимо реальный предмет покрывать ретрорефлективным материалом.

В целом, система SCAPE удовлетворяет поставленным задачам коллаборации. Достоинством является естественное зрительное восприятие реальных предметов. Для виртуальных предметов остаётся визуальный дискомфорт восприятия – конфликт между конвергенцией и аккомодацией, усталость глаз и головная боль при длительной работе со стереоскопическими однофокусными изображениями.

При реализации системы возникают дополнительные трудности, связанные с использованием имеющихся ретрорефлективных материалов [25]. Для этих целей производят два сорта материалов: матрицы с микро-шариками и матрицы с микро-призмами, у которых три грани взаимно перпендикулярны. Характерный размер элемента матриц ~ 80 мкм.

Доступные материалы оптимизированы не для оптики изображений, а для обеспечения безопасности дорожного движения. Они отражают свет фар от дорожных знаков назад к водителю, и поэтому лучи идут под углом ω по отношению к падающим лучам (в среднем $\omega \approx 3^\circ$). Это приводит к тому, что воспринимаемый размер и глубина отраженного изображения, а также размер выходного зрачка и его положение зависят не только от угла наблюдения, но и от глубины проекции и расстояния до рефлектора. Параметры меняются по полю зрения, возникает виньетирование, зрительное поле нестабильно. Наблюдаются артефактные явления и уширение пятна на $\Delta\omega \approx 20$ угл. мин., как результат дифракции на микроструктуре матриц.

Ретрорефлективная виртуальная среда требует: 1) разработки совершенных ретрорефлективных зеркал для оптики изображений – с нулевым углом отражения ω и минимумом дифракции на структуре зеркала $\Delta\omega < 2 \div 5'$, а также 2) создания дисплеев со стимулами аккомодации.

1.3 Иммерсивная виртуальная среда

Построенная на основе иммерсивных наголовных дисплеев и стереокамер, виртуальная среда является воплощением идеи смешанной реальности (Mixed Reality), разработанной японской фирмой Canon [26].

На рис.2 показана структурная схема монокулярного блока наголовного стереодисплея, содержащая микродисплей для воспроизведения компьютерных комбинаций изображений виртуально-реального мира и призмный окуляр, имеющий, по меньшей мере, одну анаморфотную поверхность. Предметы реального мира через клиновидную призму с отражающей задней и полупрозрачной передними поверхностями воспринимает объектив камеры, видеосигналы от которой поступают на обработку в компьютер. Клиновидная призма способствует приближению центра проекции объектива к оптическому центру глаза. В простейшем случае, компьютер накладывает изображение виртуальных

предметов на изображение от видеокамер и, в итоге, получают комбинированные изображения.

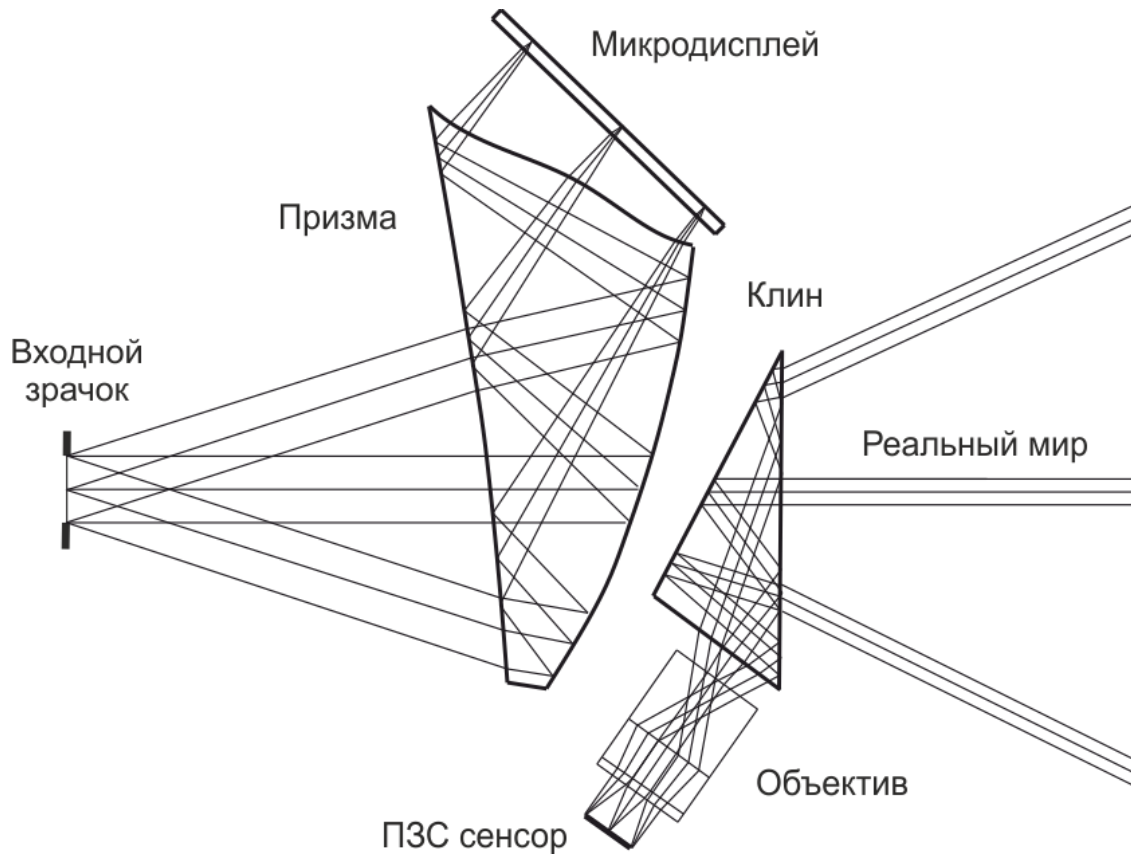


Рисунок 2 – Иммерсивный наголовный дисплей с видеокамерой

В системе Mixed Reality попытались решить задачу достоверной интерпозиции виртуальных и реальных предметов. Для этого на реальные предметы, находящиеся в области визуального интереса, наклеивают маркеры в виде бинарных мозаик, что упрощает программный поиск соответственных точек на стереопарах, полученных видеокамерами, ускоряет 3D реконструкцию реальных предметов и обеспечивает их взаимодействие с виртуальными предметами (рис. 3). К сожалению, предложенный вариант не является общим, потому что «маркировать» весь реальный мир невозможно.



а)



б)

Рисунок 3 – Использование маркеров: а) реальные предметы; б) видимая комбинация предметов

Другая проблема представляется более серьёзной. Известно, что изображение окружающей среды, получаемое от камеры, снабженной оптическим объективом, не соответствует естественному зрительному восприятию той же среды человеком [27]. Показано, что искажения масштабов предметов и глубины пространства могут достигать десятки процентов, как на малых, так и на больших расстояниях. Ошибки происходят из-за того, что объектив камеры строит *двумерное* изображение с фиксированным фокусным расстоянием (техническое зрение), в то время как зрительная сенсорная система формирует *трехмерное* изображение, работая с переменным фокусным расстоянием (когнитивное зрение) [28]. Ещё одна проблема – это визуальный дискомфорт, потому что в системе Mixed Reality нет ни программных, ни оптических средств генерации стимулов аккомодации [29]. И, наконец, стоимость Canon Mixed Reality – \$125,000 – чрезвычайно высока.

Для решения этих проблем предлагается схема, показанная на рис.4. Дисплейная часть схемы содержит микродисплей для воспроизведения виртуально-реальной сцены, мультифокальный проекционный объектив с поворотным зеркалом, светоделительную пластину и непрозрачное вогнутое зеркало, проецирующее комбинированную сцену через входной зрачок в глаз

наблюдателя. Монокулярный дисплей оснащён видеокамерой и КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) сенсором глубины. При этом реальная сцена представляется в формате XYZ RGB, где XYZ – положение точки, а RGB – цвет точки. Точно в таком же формате и в такой же проекции можно представить и компьютерную виртуальную сцену. Процедуры удаления невидимых поверхностей и формирования стимулов аккомодации могут работать над общим потоком данных, содержащим реальные и виртуальные предметы. Это гарантирует достоверную интерпозицию-окклюзию предметов и отсутствие дискомфорта при работе в рамках проективного преобразования, характерного для технического зрения.

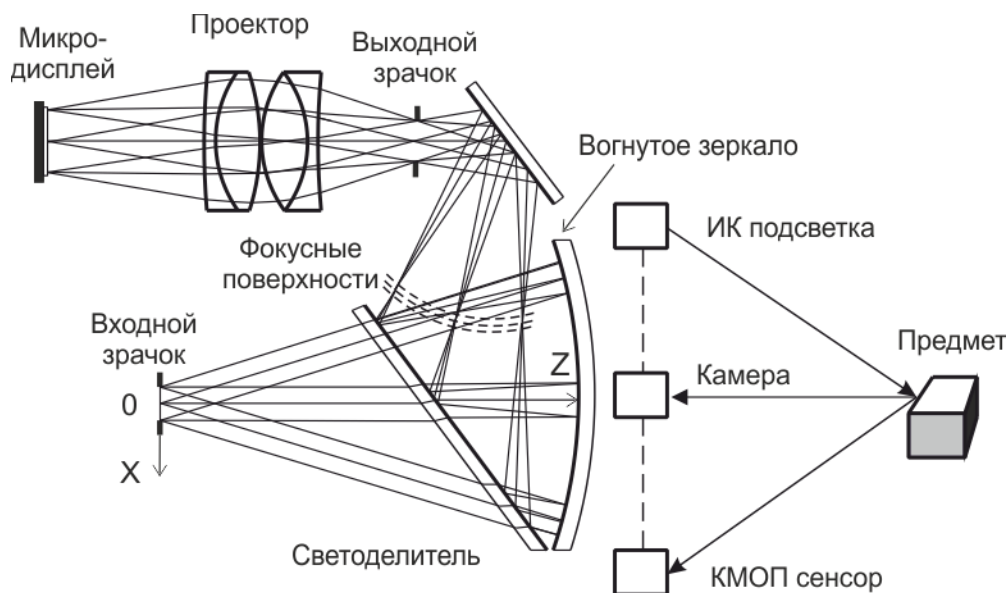


Рисунок 4 – Иммерсивный наголовный дисплей с измерителем дальности и видеокамерой

Отметим, что необходимые для схемы сенсоры глубины уже получили распространение в виде недорогих матричных дальномеров, работающих в реальном времени. Это времяпролетные Z-камеры [30] и сенсоры со структурным освещением [31,32], работающие с планшетами Nexus10 и iPad. Характерной особенностью сенсоров является использование ИК-подсветки и КМОП-приемников, что и отражено на рис.4.

Иммерсивная виртуальная среда имеет преимущества перед ретрорефлективной средой, но требует разработки быстродействующих мультифокальных проекционных объективов и носимых на голове дальномеров с малыми весогабаритными параметрами. Единственный недостаток – это искажение естественного зрительного восприятия виртуальной среды с добавленной реальностью.

1.4 Просветная виртуальная среда

Концепция просветной среды возникла в качестве альтернативы ретрорефлективным средам, которые трудно реализовать из-за отсутствия материалов для получения оптических изображений высокого качества. Просветная среда также позволяет зрителю видеть реальные объекты, как и ретрорефлективная, и также обеспечивает естественное когнитивное зрительное восприятие реальных предметов.

На рис.5 показана концептуальная схема просветного наголовного дисплея, содержащая микродисплей для воспроизведения виртуальной сцены, проекционный объектив с поворотным зеркалом и зеркальный окуляр. Окуляр состоит из светоделительной пластины и полупрозрачного вогнутого зеркала, проецирующего виртуальную сцену через выходной зрачок в глаз наблюдателя.

Поскольку светоделитель и вогнутое зеркало полупрозрачные, то наблюдатель легко видит и реальные предметы окружающей обстановки. Но в отличие от ретрорефлективной среды непрозрачные предметы не могут выполнять функцию автоматической окклюзии, т.е. закрывать следующие за ними по глубине виртуальные предметы. Таким образом, в традиционных просветных дисплеях главный *косвенный* стимул глубины предметов теряется.

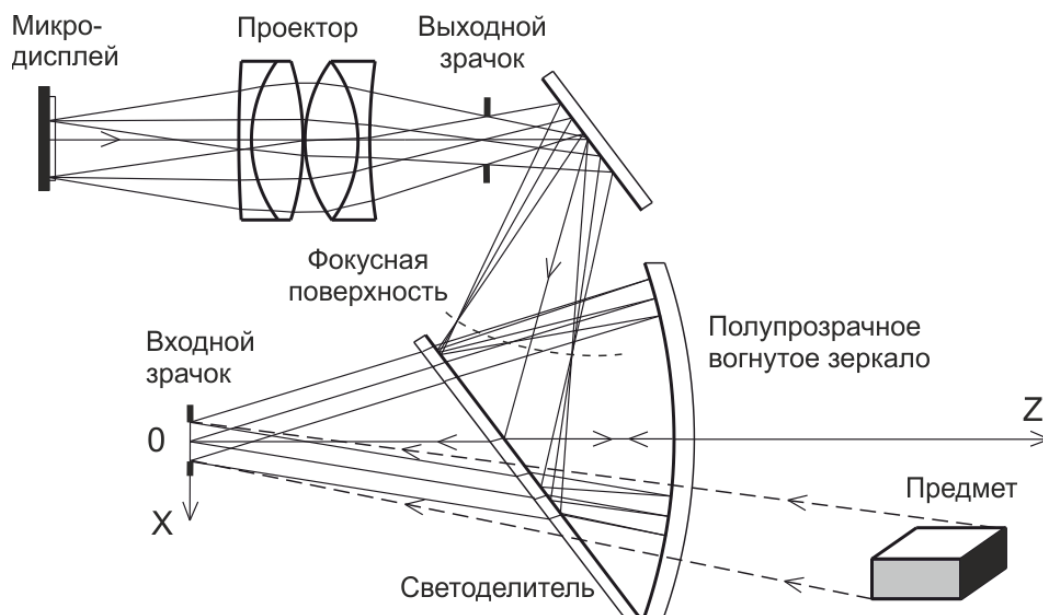


Рисунок 5 – Просветный наголовный дисплей

Обычно дисплеи выпускают в виде носимых очков (фирмы Google, Laster, Olympus, Lumus и др.), которые отображают вспомогательную информацию в виде 3D моделей (рис. 6а), символьную и/или навигационную информацию (рис. 6б) и т.д. Из-за отсутствия корректной глубины виртуальные картинки воспринимаются всегда на фоне реального предметного окружения.



а



б

Рисунок 6 – Изображения на просветных дисплеях: а – 3D модели (Laster);
б – навигационная информация (OdaLab)

Чтобы устранить отмеченный недостаток предлагается следующая технология.

1) Встроить в наголовный дисплей сенсор глубины, измеряющий координаты положения X, Y и дальности Z реальных предметов (рис.7).

2) При формировании виртуальной сцены в процедуре удаления невидимых поверхностей сцены методом Z -буфера учесть координаты реальных предметов с цветом *нулевой* яркости. В результате, в тех позициях экрана, где должен появиться реальный предмет возникнет его чёрная виртуальная тень, закрывающая все виртуальные предметы, следующие за ней. Свет от реального предмета заполнит эту тень, обеспечив тем самым корректную окклюзию.

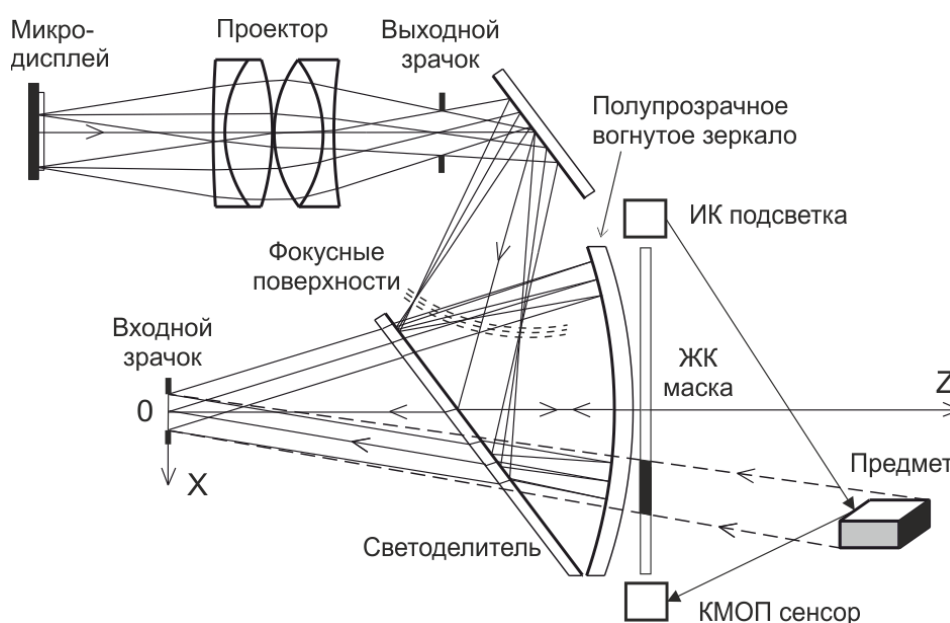


Рисунок 7 – Просветный наголовный дисплей с измерителем дальности и окклюзивной маской

Корректное отображение виртуальных предметов, находящихся перед реальными предметами, может быть выполнено с помощью одноразрядной жидкокристаллической маски, имеющей пиксельное разрешение по полю

зрения. На том участке поля, где нужно изобразить виртуальный предмет, маской создаётся тень для реального предмета.

Наличие просветного режима наголовных дисплеев весьма актуально, так как позволяет настраивать и калибровать проективное преобразование виртуальной среды с тем, чтобы воспринимаемый образ виртуальных предметов совпадал с их реальными прототипами для естественного, когнитивного зрительного восприятия.

В целом, система с просветной виртуальной средой имеет преимущества перед ретрорефлективной и иммерсивной средами, и удовлетворяет поставленным задачам коллаборации в наибольшей степени.

Выводы главы 1

Проведенный анализ структурных схем наголовных дисплеев для виртуальных сред трёх типов: ретрорефлективной, иммерсивной и просветной среды показал, что для получения высококачественных изображений ретрорефлективная виртуальная среда требует разработки более совершенных оптических зеркал, отражающих свет с нулевым углом и минимумом дифракции на структуре зеркала. Для достижения глобальной интерпозиции-окклюзии реальных и виртуальных предметов в иммерсивной виртуальной среде предложено встроить в наголовный дисплей не только видеокамеры, но и сенсоры глубины. Для устранения некорректной окклюзии реальных и виртуальных сцен в просветной виртуальной среде предложено встроить в наголовный дисплей сенсор глубины реальных предметов и окклюзивную маску. Для обеспечения визуального комфорта в любой из виртуальных сред необходима разработка многоплановых, мультифокальных наголовных стереодисплеев, стимулирующих аккомодацию глаз.

Отсутствие стимулов аккомодации и различной дефокусировки предметов на разных расстояниях ухудшает когнитивные способности восприятия. Увеличиваются погрешности в оценке размеров и удалённости предметов. Между аккомодацией и конвергенцией возникает конфликт, появляется бинокулярный стресс, утомление глаз, головная боль и т.д. Данные проблемы озвучивает ряд крупных фирм-производителей 3D дисплеев.

Компания Sony признала [33] наличие неприятных побочных эффектов от 3D-фильмов и игр (головокружение, тошнота и др.), и рекомендовала ограничить такие развлечения для детей, особенно до шести лет.

Ранее аналогичное предупреждение [34] выпустила компания Samsung. Перечисляется гораздо больше возможных неприятностей от стереокино — включая ухудшение зрения, мышечный тик, головную боль и дезориентацию. Рекомендуются не ставить 3D-телевизоры вблизи лестниц и балконов. А также не рекомендуется смотреть стереокино, будучи в состоянии опьянения, либо беременности.

В России данную проблему предпочитают решать не кардинальными методами, а лишь частично пытаясь ослабить визуальный дискомфорт, за счет «правильной» настройки различного ряда параметров. Например, в данной статье [35] изложены принципы определения допустимых резервов увеличения экранных положительных и отрицательных параллаксов, сформулированы требования к организации стереокинопоказа, а так же приведены доводы к необходимости нормирования параметров стереопар.

На практике это означает уменьшение объема картинки и размытия дальнего плана, чтобы зритель не фокусировал свой взгляд на этот план, но при этом ощущение объемности оставалось. Но даже при таких настройках авторы не рекомендуют смотреть стереокино более 1,5 часов.

В настоящее время существует различные способы, позволяющие создавать множество планов изображений и их комбинирования. Однако не существует критериев оценки таких важных и существенных факторов как распределение интенсивности изображений и дифракционной глубины

пространства. Нет обоснованного критерия выбора межплановых расстояний. А также проведен лишь небольшой ряд исследований 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.

Глава 2 Анализ распределения аксиальной интенсивности изображений

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

В 3D дисплеях с «добавленной аккомодацией» [36-40] изображение формируется путем линейной комбинации ограниченного числа плоскопараллельных планов-изображений, распределенных по глубине пространства. В [36] показано, что предельное разрешение и визуальный комфорт достигается, если расстояние между планами не превышает дифракционной глубины фокуса, которая для типового зрачка глаза диаметром 3 мм равна 0.25-0.3 дптр. В [36] представлены результаты исследования экспериментального образца бипланового мультифокального стереодисплея наголовного типа. Установлено, что на реальном образце соответствие дифракционной глубины расстоянию между планами нарушается примерно вдвое. Визуально комфортное изображение может быть получено при расстоянии между планами ~0.5-0.6 дптр. В [37,38] расстояние между планами устанавливают равными 0.67 дптр. В [41] с помощью авторефрактора с горячим зеркалом в инфракрасном свете экспериментально подтверждена линейная зависимость аккомодации глаза от взвешенной суммы изображений на планах, отстоящих до 1 дптр.

2.1 Оптическая схема наголовного дисплея с использованием модели глаза и заданные сигналы

На рис. 8 представлена схема наголовного дисплея, содержащая микродисплейную матрицу Р, окуляр О и глаз с сетчаткой R. Окуляр выполнен в

виде тонкой линзы, а в качестве глаза используются модели Эскудеро–Санс, Наварро (1999) и Давида Атчисона (2006) [42].

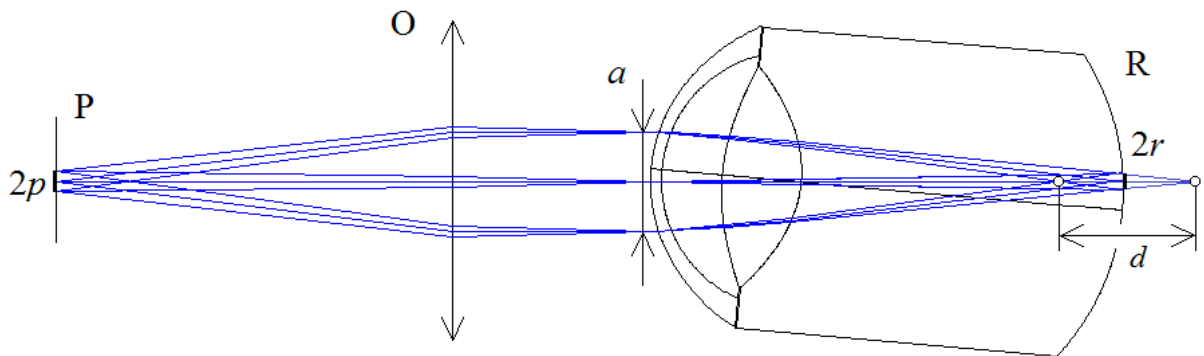


Рисунок 8 – Схема наголовного дисплея с использованием модели глаза

Зрительная ось, проходящая через узловую точку глаза и фовеальную ямку сетчатки, пересекает оптическую ось глаза под углом 5° . Свет проникает в глаз через приведенный к роговице входной зрачок диаметром a мм. Путем гауссовой аподизации входных зрачков учитывается дирекционный эффект Стайлса и Крауфорда [43].

В [40] для анализа аксиальной интенсивности и дифракционной глубины дисплеев применялись точечные источники света. 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 $2p = 9.6 \div 15$ 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 пикселей источника и изображения практически совпадают.

Все последующие расчеты выполнены на основе Фурье–оптики с помощью программы оптического конструирования ZEMAX–EE фирмы Focus Software, Inc. при следующих ограничениях:

- 1) длина волны $\lambda=550$ нм, что соответствует самому низкому порогу спектральной чувствительности для фотопического (колбочкового, цветового) зрения;
- 2) диаметр a аподизированного зрачка изменяется от 2 мм до 6 мм;
- 3) полуширина пиксела $r = 2.5, 5$ и 7.5 мкм, что с погрешностью $< 3\%$ соответствует угловому разрешению $\gamma = 1, 2$ и 3 угловым минутам.

2.2 Проведение дифракционного анализа изображения

На рис. 9 показано геометрическое изображение пиксела на сетчатке в плоскости ХОУ. Центр пиксела лежит на зрительной оси ОZ в начале координат. Изображение может быть представлено в виде:

$$J(x, y) = \begin{cases} I_0 & \text{при } -r \leq x, y \leq r \\ 0 & \text{при } -r > x, y > r \end{cases}, \quad (1)$$

где I_0 – равномерная по поверхности интенсивность пиксела. Пусть $h(x, y)$ – системная функция рассеяния точки (ФРТ). Тогда дифракционное изображение пиксела:

$$I(x, y) = \iint_{-r}^r h(u, v) \cdot J(x - u, y - v) du dv, \quad (2)$$

где оба интеграла имеют одинаковые пределы от $-r$ до r . Очевидно, что в центре пиксела при $x=y=0$ интенсивность равна

$$I(0,0) = I_0 \iint_{-r}^r h(x, y) dx dy, \quad (3)$$

т.е. на зрительной оси интенсивность равна дифракционной энергии, рассеиваемой в квадрате со стороной $2r$. Если пиксел смещается вдоль оси Z

(например, в позицию $z = -\delta$, рис. 9), то его аксиальная интенсивность становится равной

$$I(0,0,z) = I(z) = I_0 \iint_{-r}^r h(x,y,z) dx dy, \quad (4)$$

где $h(x,y,z)$ – трёхмерная ФРТ.

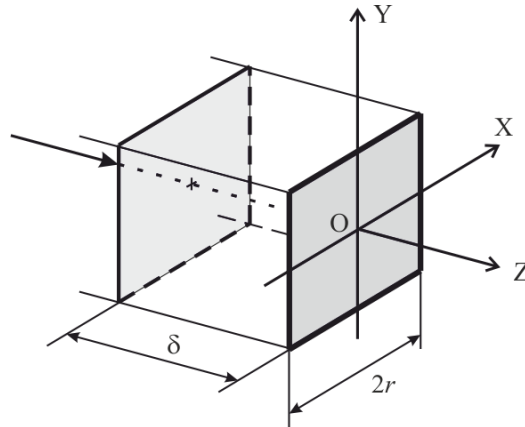


Рисунок 9 – Геометрическое изображение пиксела на сетчатке в плоскости XOY

В [40] было исследовано распределение аксиальной интенсивности в системе с точечными источниками света. Показано, что фокусировка на пиковую интенсивность кривой при любых aberrациях определяет местоположение лучшей плоскости изображений. Лучшей в том смысле, что в этой плоскости изображение световой точки (например, звезды) подобно пятну рассеяния Эйри. При этом *дифракционная глубина фокуса* (ДГФ) соответствует четвертьволновому правилу Релея и определяется на уровне $0.8 I_0$. Но в [40] учитывалась интенсивность только центральной точки пиксела в виде $I_0 h(0,0,z)$. Отличие аксиальных точек (4) в том, что их интенсивность пропорциональна энергии, заключённой в пиксельном квадрате. Энергия пиксела увеличивается, что и приводит, на наш взгляд, к увеличению ДГФ.

Выбор уровня потери пиковой интенсивности для расчёта дифракционной глубины фокуса в исследуемой системе является задачей, не решаемой или труднорешаемой аналитически. Поэтому воспользуемся некоторыми

допущениями и приближениями. Пусть функции рассеяния нормализованы, фокус изображения находится в точке $z=0$, а размеры пикселя сохраняются на уровне $0.5I_0$. Тогда, как показано на рис. 10, «идеальный» пиксел пересекается множеством ФРТ и, согласно (2), размывается на своих границах минимальным образом, а интенсивность (4) центральной точки становится максимальной. При удалении пикселя от фокуса за счёт aberrаций, вызванных дефокусировкой, ФРТ уширяется и в предельном случае (см. рис.10), радиус пятна ФРТ на уровне $0.5I_0$ становится равным полуширине пикселя. Результаты численного интегрирования при этом показывают, что если ФРТ аппроксимирована гауссовой функцией, то в пиксельном квадрате рассеивается $\sim 70\%$ всей энергии, в то время как вдоль осей x или y интенсивность пропорциональна $\sim 0.8 I_0$.

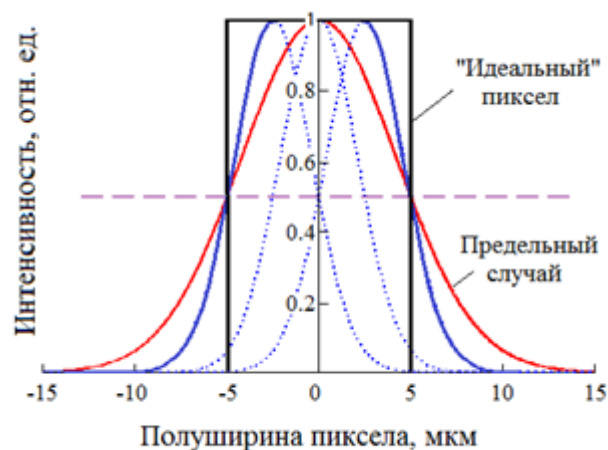


Рисунок 10 – «Идеальный» пиксел, график зависимости интенсивности пикселя от его размеров

Для расчёта распределений интенсивности вдоль зрительной оси (4) в программе ZEMAX использован оператор концентрации энергии DENS – 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 рис. 11. Для перевода смещений фокуса δ в диоптрийную метрику применялось известное из [27] 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 ДГФ, 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.

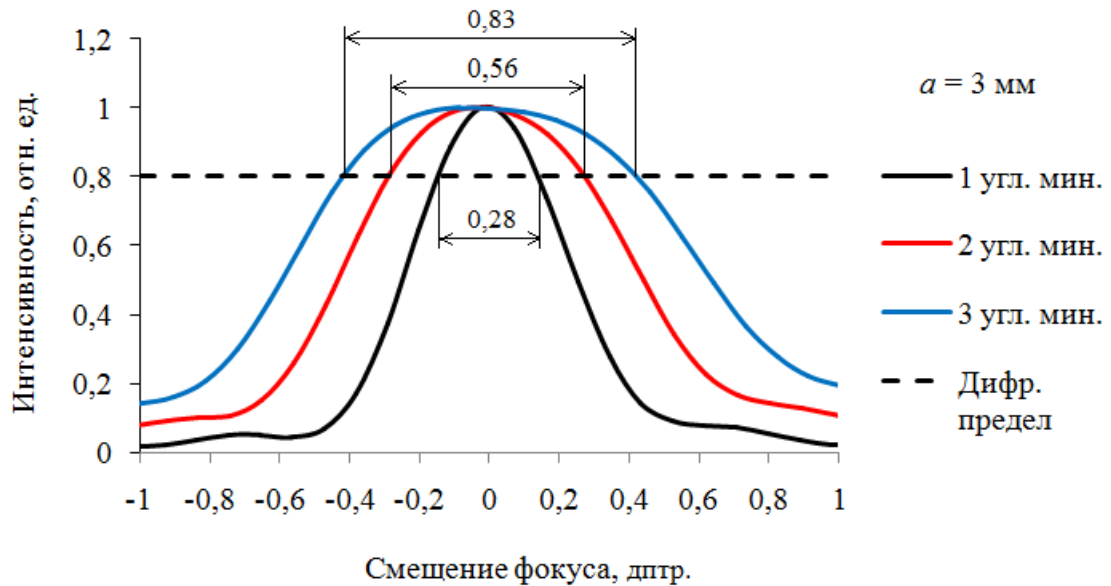


Рисунок 11 – Нормализованные результаты расчёта на модели глаза Атчисона для входного зрачка диаметром $a = 3 \text{ мм}$

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 $5/3 \text{ мкм}$, так что размер пиксела $2r=10 \text{ мкм}$. Расчёт проводился для изображения в фокусе и при дефокусировке на $\pm 0.28 \text{ дптр.}$, или ДГФ=0.56 дптр (рис. 11) для разрешения 2 угл. мин. Изображения интенсивностей пикселей приведены на рис. 12: а) в виде 3D поверхности, и б) на плоскости в псевдоцвете (false color). На рис. 12а представлены поверхности рассеяния на «ступеньках» пиксела, которые находятся в согласии с ФРТ на рис. 10. Обратим внимание на то, что гауссова аподизация зрачка и интегрирование хорошо убирают «хвосты» функции рассеяния, и поэтому сама ФРТ может быть

аппроксимирована функцией Гаусса. При детальном рассмотрении рис. 5b можно обнаружить, что на уровне интенсивности 50% в пределах дифракционной глубины сохраняются размеры пиксела $2r$ по горизонтали и вертикали, но уменьшаются размеры по диагонали.

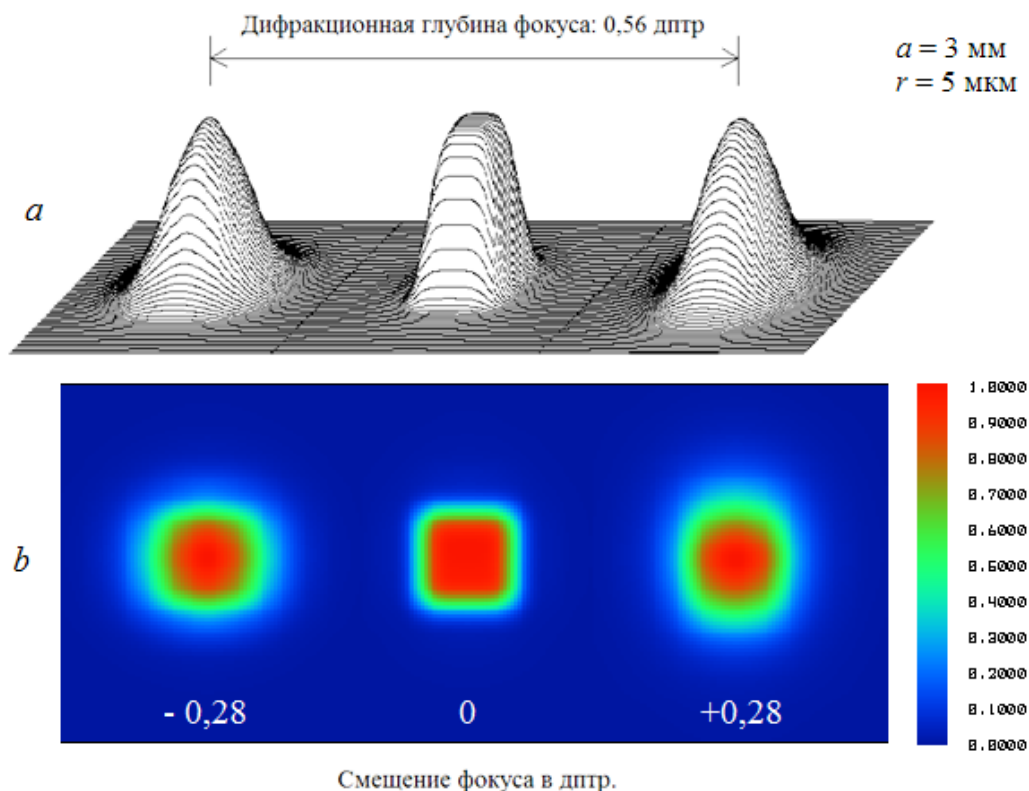


Рисунок 12 – Изображения интенсивностей пикселей: а) в виде 3D поверхности
б) на плоскости в псевдоцвете (false color)

Пиксел приближается к округлой форме. Заметен небольшой астигматизм, вызванный поворотом зрительной оси относительно оптической оси глаза. В целом, компьютерный эксперимент подтвердил достоверность проведенных исследований.

2.3 Определение дифракционной глубины фокуса

ДГФ определялась на двух моделях глаза на длине волны $\lambda=550 \text{ нм}$. 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:

- 1) Для выбранного зрачка a в согласии с (2) из [36] 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;
- 2) Вычислялась функция DENF для заданного размера полуширины пиксела r ;
- 3) Выполнялась нормализация кривой DENF для получения пиковой интенсивности;
- 4) На уровне 80% от пиковой интенсивности по кривой DENF рассчитывалась ДГФ.

Результаты показаны на рис. 13. Они дополнены двумя кривыми: дифракционным пределом ДГФ и данными субъективного эксперимента Кэмпбелла, приведенными в [41]. Дифракционный предел $4\lambda/a^2$ получен в [40] 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.

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.

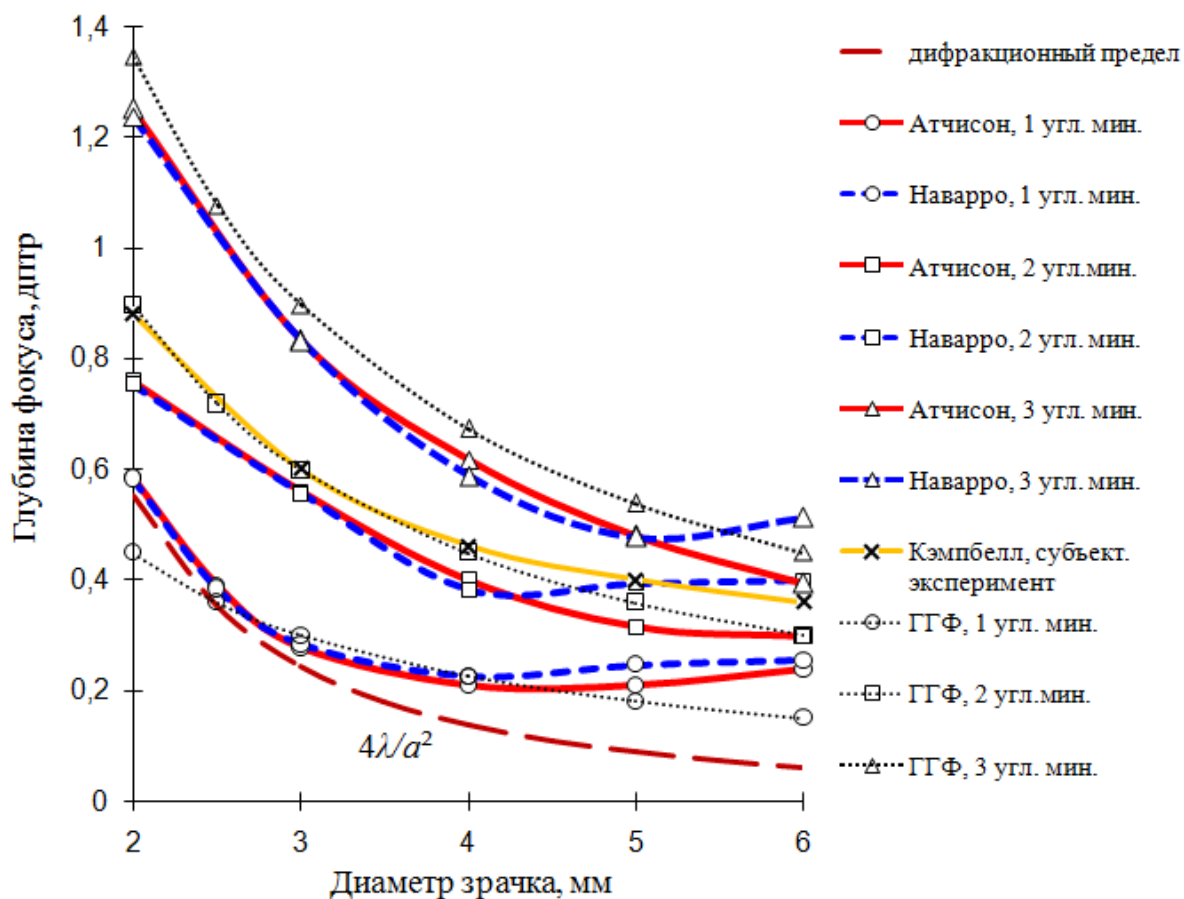


Рисунок 13 – Зависимость глубины фокуса от диаметра зрачка глаза

Выводы главы 2

В данной главе проведен анализ распределения аксиальной интенсивности изображений, заданных микродисплейными матрицами с характерным размером пикселей от 5 до 15 мкм. Показано отличие аксиальной интенсивности от таковой в системах с точечными источниками света, что обусловлено увеличением энергии, заключённой в пиксельном квадрате, по сравнению с энергией в центральной точке пиксела. Проведен дифракционный анализ пиксельных изображений и определены количественные характеристики дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности и диаметра зрачка глаза. Для типового зрачка диаметром 3 мм дифракционная глубина фокуса прямо пропорциональна угловой разрешающей способности и

увеличивается от 0.28 до 0.83 дптр. при изменении разрешения от 1 до 3 угл. мин. Проведен анализ геометрической глубины фокуса, который показал, что глубина прямо пропорциональна разрешению и обратно пропорциональна диаметру зрачка. Для зрачков 3÷4 мм геометрическая и дифракционная глубина практически совпадают.

Глава 3 Улучшение качества трехмерной картины при комбинировании планов-изображений

В данной 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.

Для согласования дистальных стимулов глубины – конвергенции и аккомодации глаз – в КТИ НП СО РАН совместно с НФ ИФП СО РАН «КТИ ПМ» и ООО «Софтлаб-НСК» разработан экспериментальный стереоскопический дисплей с бифокальными окулярами. Каждый окуляр содержит две микродисплейные матрицы на органических светодиодах, изображения которых комбинируются с помощью светоделительного кубика. Таким образом, объемное изображение представлено четырьмя SVGA-изображениями. Разработана структурная схема устройства, принцип формирования объемного изображения и программное обеспечение для экспериментальных исследований визуального восприятия человека.

На рис. 14 приведена схема, состоящая из модели двух-планового окуляра 1 и модели глаза 2 с входным зрачком a . Окуляр содержит два плоских изображения P1 и P2, и с помощью линзы L формирует их мнимое изображение.

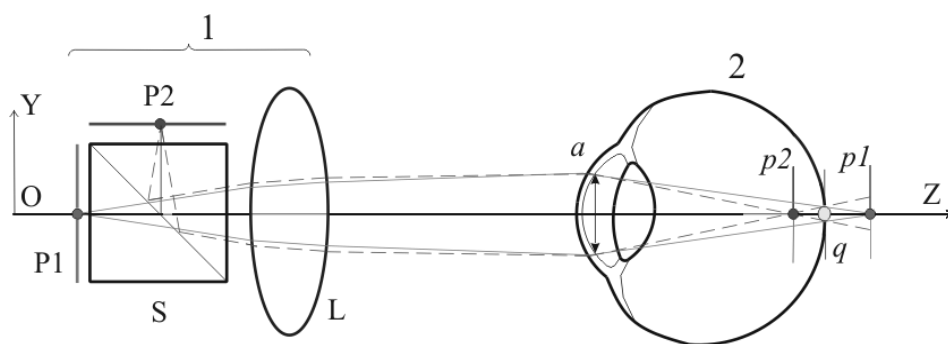


Рисунок 14 – Модель двух-планового окуляра

Благодаря светоделительному кубику S мнимые изображения P1 и P2 оказываются соосными и перпендикулярными зрительной оси OZ. Излучения элементов изображений P1, P2 фокусируются хрусталиком глаза в световые пятна изображений p1 и p2 таким образом, чтобы максимум суммарной энергии находился в районе фовеа q.

Для того что бы получить картинки для ближнего – $I_n(u,v)$ и дальнего – $I_f(u,v)$ плана каждого из глаз, полученные изображения компонуются путем интерполяции интенсивности по глубине. Сам процесс интерполяции происходит следующим образом:

$$\beta(u,v) = \begin{cases} 0, \text{при } Z(u,v) < Z_n \\ 1, \text{при } Z(u,v) > Z_f \\ \frac{\frac{1}{Z_n} - \frac{1}{Z(u,v)}}{\frac{1}{Z_n} - \frac{1}{Z_f}}, \text{при } Z_n \leq Z(u,v) \leq Z_f \end{cases} \quad (5)$$

где Z_n – линейное расстояние до ближнего плана, Z_f – линейное расстояние до дальнего плана. При этом изображение для ближнего плана вычисляется по формуле :

$$I_n(u,v) = (1 - \beta(u,v)) * I(u,v), \quad (6)$$

а для дальнего плана по формуле:

$$I_f(u,v) = \beta(u,v) * I(u,v). \quad (7)$$

На основе описанной схемы был проведен дифракционный анализ пиксельных изображений, определены количественные характеристики дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности и диаметра зрачка глаза.

Однако при получении изображения был обнаружен существенный недостаток, а именно - потеря контраста на 20-30% на середине интервала глубины. Пример такого провала показан на рис. 15, 16. На фотографиях изображена боковая часть космической станции.

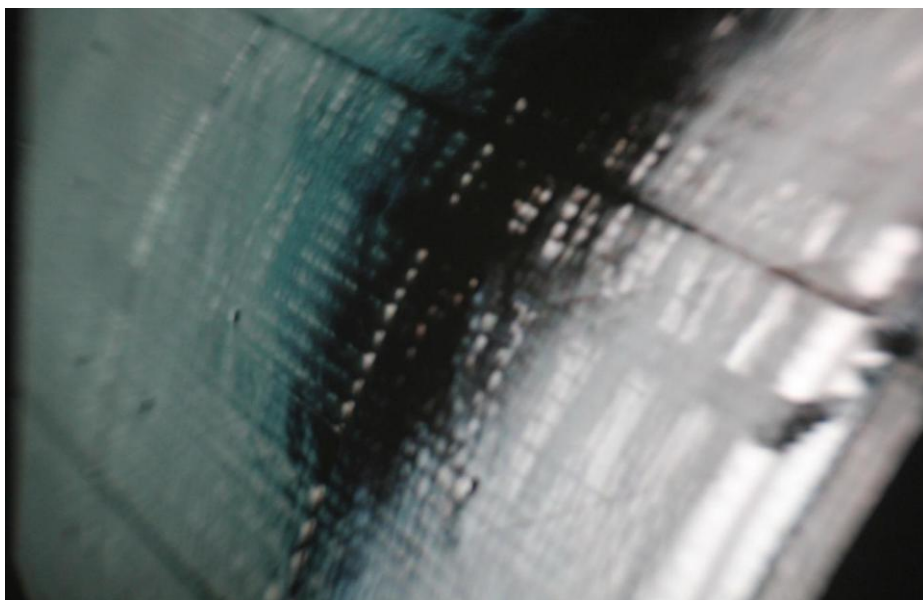


Рисунок 15 – Заметная потеря контраста на середине интервала глубины

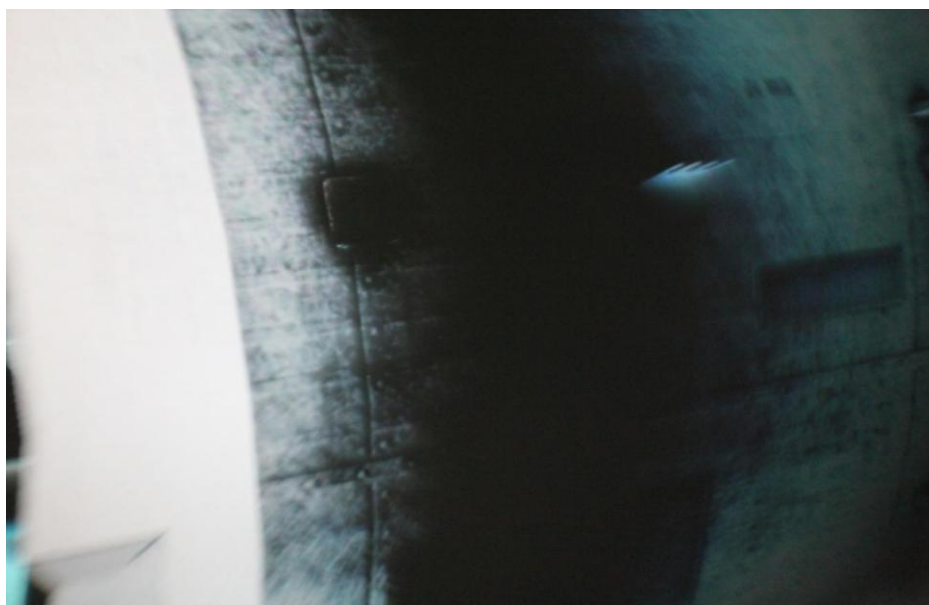


Рисунок 16 – Заметная потеря контраста на середине интервала глубины

Для устранения провалов глубины в дальнейшем рассматривается система, формирующая объемное изображение путем линейной комбинации ограниченного числа плоскопараллельных планов-изображений, распределенных по глубине пространства [36], со зрачком 3 мм на модели глаза Атчисона.

На рис.17 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:

$$I(x,y,z) = I(x,y) [PSFA(z - Z_n) (1 - \beta(x,y)) + PSFA(z - Z_f) \beta(x,y)], \quad (8)$$

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 $20 \div 30$ %, которые необходимо устранить.

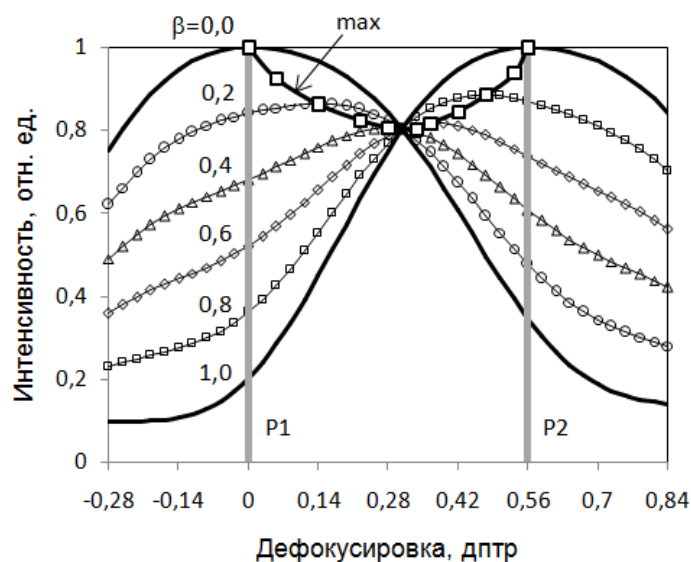


Рисунок 17 – Линейные комбинации аксиальных интенсивностей изображений P1,P2 для разных коэффициентов β при $a=3$ мм; max – кривая максимальных значений комбинаций.

3.1 Повышение контраста

Одним из способов повышения контраста автором предлагается ввод дополнительных коэффициентов $k1=(1 - \beta(x,y))$ и $k2= \beta(x,y)$ в формулу (8) и их нормирование:

$$I(x,y,z) = I(x,y) [PSFA(z - Z_n) k1 + PSFA(z - Z_p) k2]. \quad (9)$$

На рисунке 18 показаны рассчитанные коэффициенты $k1'$ и $k2'$ после нормирования $k1$ и $k2$. При использовании данных коэффициентов в формуле (9) мы получим следующее распределение интенсивностей комбинаций, приведенных на рис 19. Как видно по линии тах провал контраста устранен полностью.

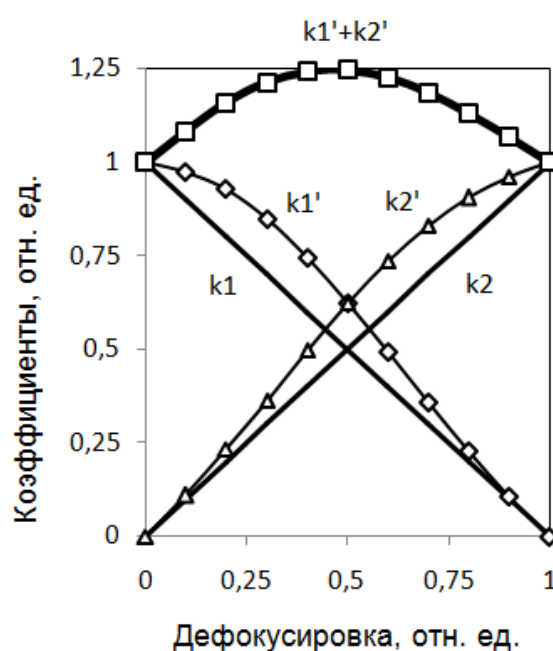


Рисунок 18 – Нормирование коэффициентов линейной комбинации.

Но, к сожалению, данный метод не решает проблему с выравниванием стимула аккомодации. Как видно из рис. 20 погрешность стимула аккомодации может достигать 0,06 дптр, так же можно заметить что максимальное отклонение от линейности приходится на ближний план. Далее будут показаны способы устранения таких отклонений.

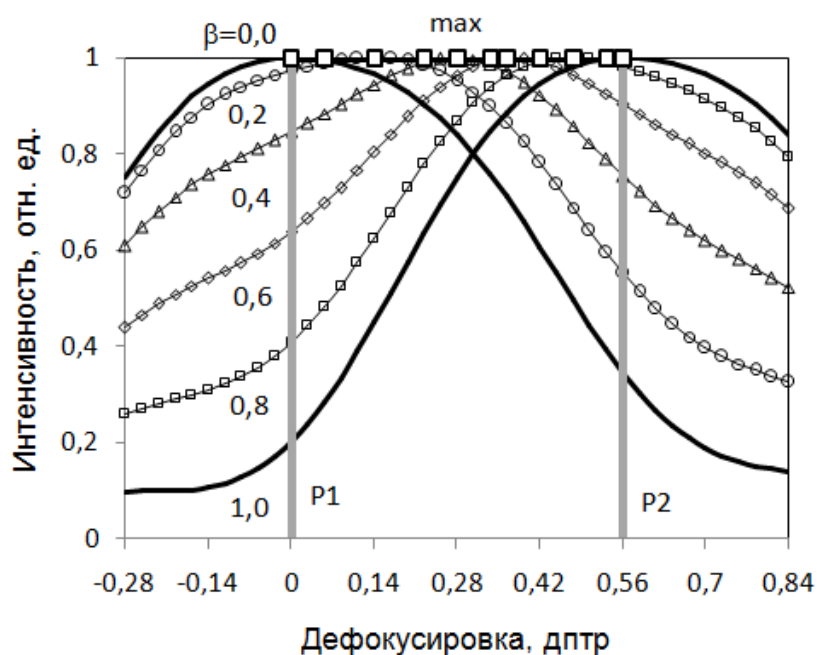


Рисунок 19 – Линейные комбинации с нормированными коэффициентами для разных значений β при $a=3$ мм

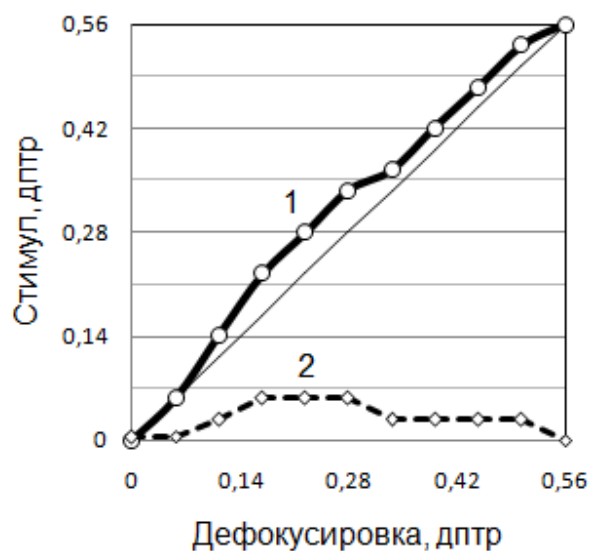


Рисунок 20 – Зависимость аккомодации от дефокусировки:

1) стимул аккомодации; 2) погрешность стимула.

В качестве результата данного способа коррекции яркости изображения приведен рис. 21, 22. С фотографией тех же частей станции, что были приведены на рис. 15, 16. Как видно провал устранен.

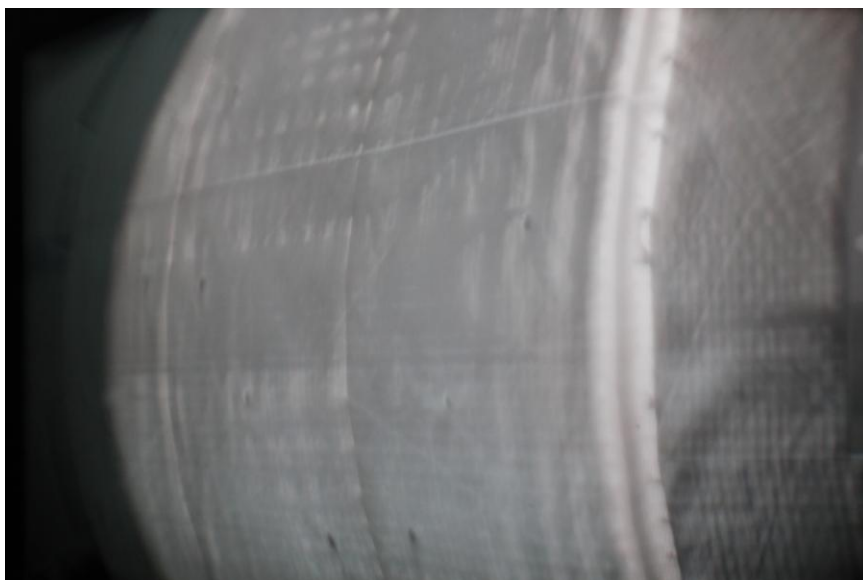


Рисунок 21 – Фотография при устраненном провале контраста

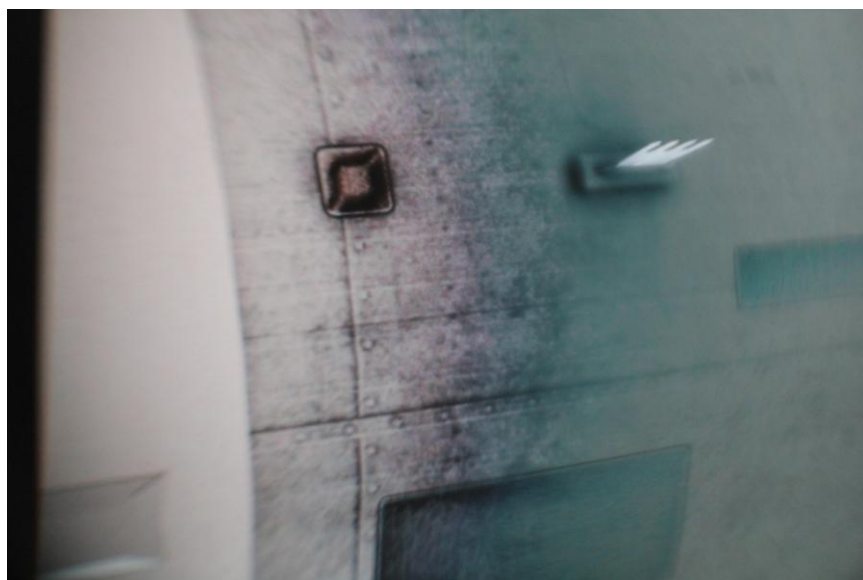


Рисунок 22 – Фотография при устраненном провале контраста

Однако указанный метод не устраняет проблему несоответствия стимула аккомодации. Согласно представленным данным на рисунке 20, величина отклонения стимула аккомодации способна доходить до значения 0,06 диоптрий. Помимо этого, выявляется наибольшая нелинейность именно в области близких расстояний наблюдения. Последующая глава посвящена поиску оптимального решения обозначенной проблемы.

3.2 Выравнивание стимула аккомодации

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 .

В отличие от предыдущего описанного способа повышения контраста, автором предлагается ввод дополнительных коэффициентов $k1=(1 - \beta(x,y))$ и $k2=\beta(x,y)$ в формулу (8) и их нормирование:

$$I(x,y,z) = I(x,y) [PSFA(z - Z_n) k1 + PSFA(z - Z_p) k2]. \quad (10)$$

Для выполнения оптимизации выполним ряд следующих действий:

а) получим одномодовую комбинацию, т.е. такую, которая имеет один максимум на заданном расстоянии между планами. Для этого достаточно сложить аксиальные интенсивности $P1$ и $P2$, как показано на рисунке 23, и посмотреть на производную;

б) построим комбинации вида $P=P1*k1+ +P2*k2$, например, при $k1=1$. Из рисунка 2 видно, что уменьшение $k2$ смещает максимум комбинации к $P1$;

в) для заданного относительного расстояния β стимула аккомодации ($0 \leq \beta \leq 1$) найдем $k2$, при котором производная комбинации равна нулю;

г) в точке β найдём максимальную величину комбинации $P_{\max}$;

д) нормированные коэффициенты $k1' = k1/P_{\max}$ и $k2' = k2/P_{\max}$ обеспечат оптимальную линейную комбинацию, т.е. отсутствие провалов и сигмоидности стимула аккомодации глаза.

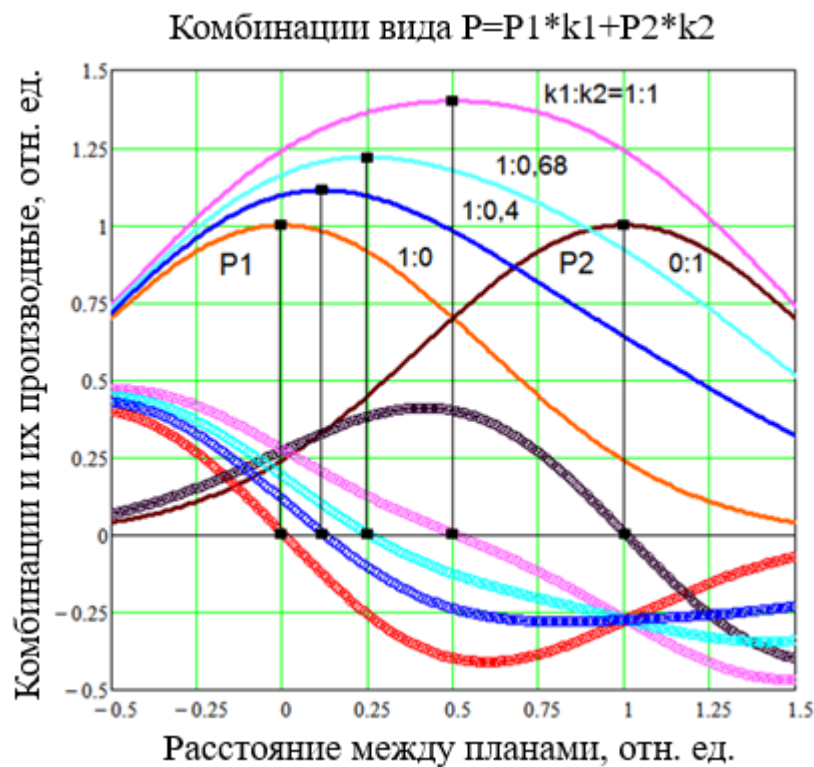


Рисунок 23 – Комбинирование планов изображений P1 и P2

В дальнейшем рассматривается система со зрачком $3 \text{ мм} \pm 10 \%$.

Уровни освещённости по Луизову: $2,7 \text{ мм} - 300 \text{ кд/м}^2$; $3,0 \text{ мм} - 100 \text{ кд/м}^2$; $3,3 \text{ мм} - 40 \text{ кд/м}^2$.

Для зрачка 3 мм при разрешении 2 угл. мин. дифракционная глубина фокуса (ДГФ) равна $0,56 \text{ дптр.}$

$$P = P1 \cdot k1' + P2 \cdot k2' \quad (11)$$

На основе коэффициентов для оптимальной комбинации при 3 мм можно построить таблицы коэффициентов для разных зрачков от $2,7$ до $3,3 \text{ мм}$. На рисунке 24 показаны кривые коэффициентов $k1$ и $k2$ для трех вариантов диаметра зрачка глаза.

По размеру зрачка можно рассчитать соответствующие коэффициенты и построить комбинацию с контрастом 100% . На рисунке 25 показана такая

комбинация для зрачка глаза с диаметром 3,3 мм. Комбинации, отличающиеся от 3 мм, будут неоптимальными.

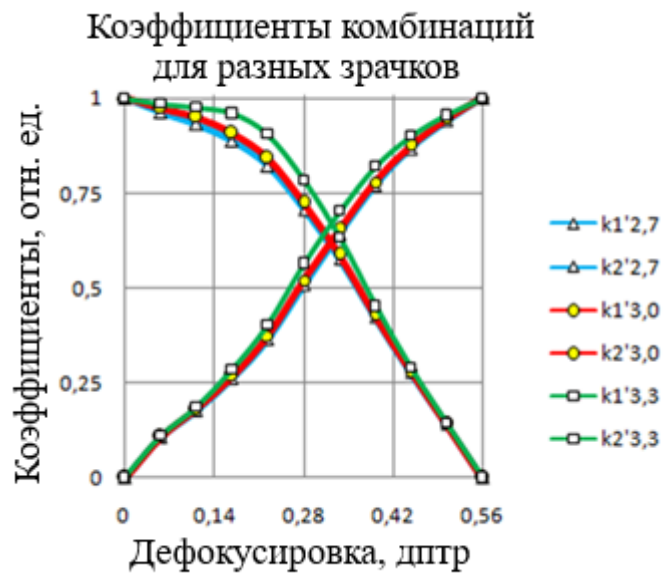


Рисунок 24 – Нормированные коэффициенты k_1' и k_2'

Они сохраняют погрешности по глубине такие, как на предыдущем графике для оптимальной комбинации. К счастью, эти погрешности небольшие.

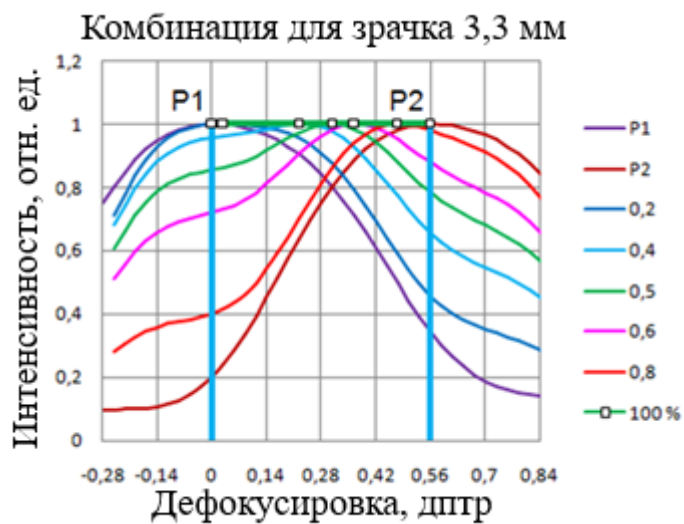


Рисунок 25 – Комбинация планов P1 и P2 с использованием нормированных коэффициентов для зрачка глаза с диаметром 3,3 мм

Следующим шагом производим расчет коэффициентов оптимизации для размеров зрачка 2,7 мм; 3 мм; 3,3 мм. Рассчитанные коэффициенты и результаты оптимизации приведены на рисунке 26.

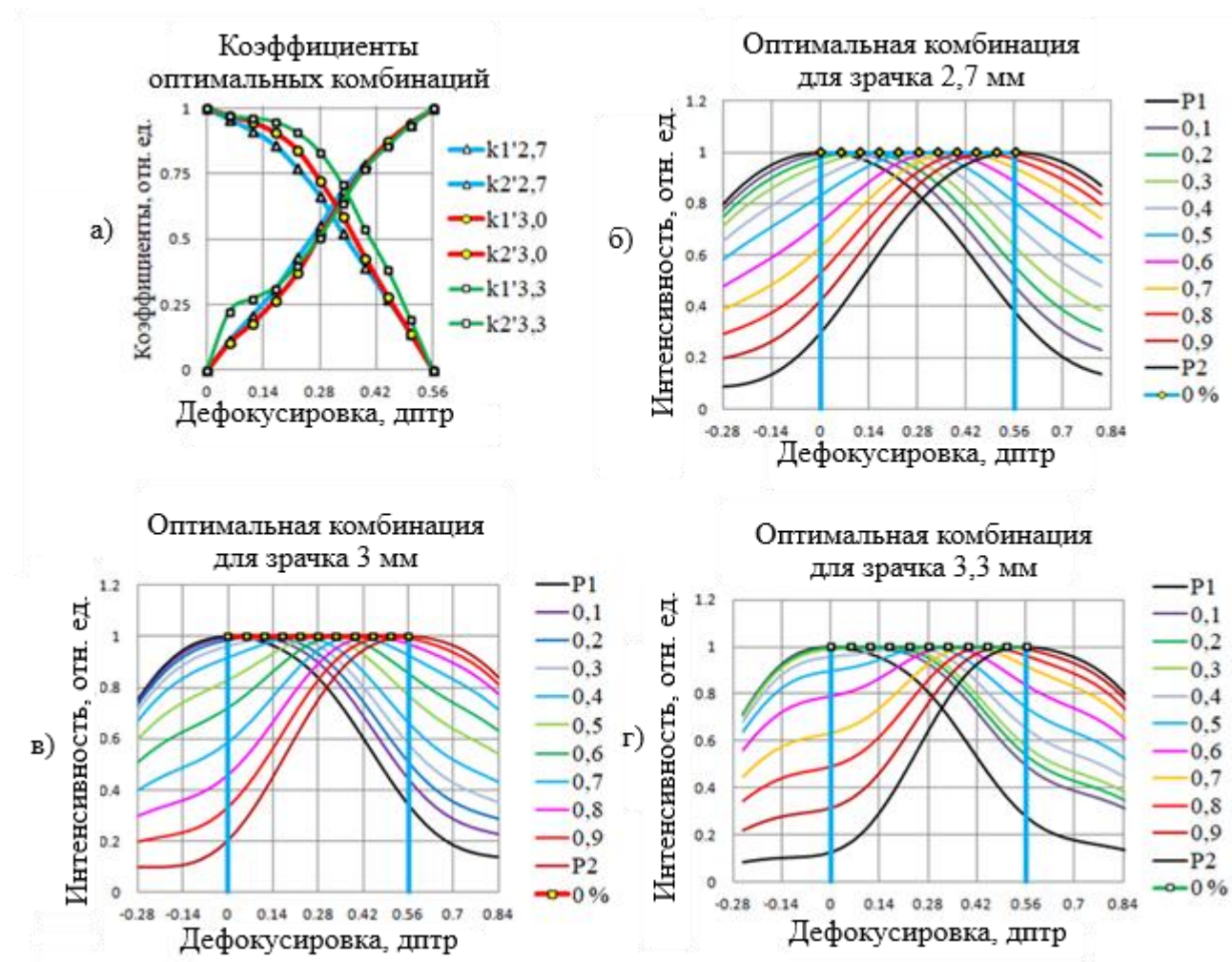


Рисунок 26 – Результаты комбинирования планов изображений:

- 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

Как видно из представленных графиков 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 мы сделаем следующий шаг и проведем нормализацию коэффициентов k_1 и k_2 сразу для зрачка $3 \text{ мм} \pm 10 \%$ и посмотрим как с такой нормализацией ведет себя контраст и линейность для зрачков при плохой освещенности (3,3 мм) и при ярком свете (2,7 мм).

Результаты оптимизации представлены на рисунках 27 и 28.

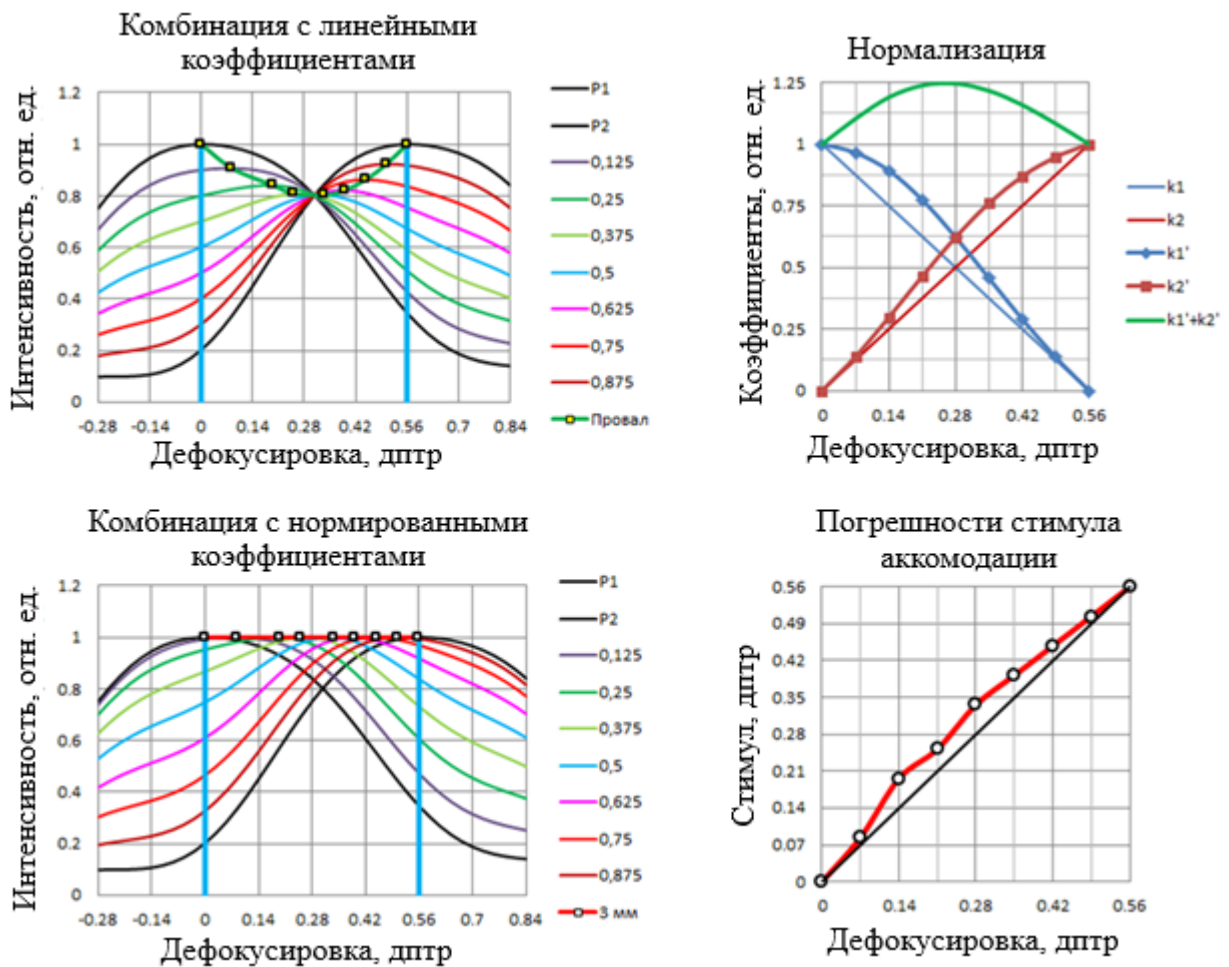


Рисунок 27 – Оптимизация на зрачке с диаметром 3 мм

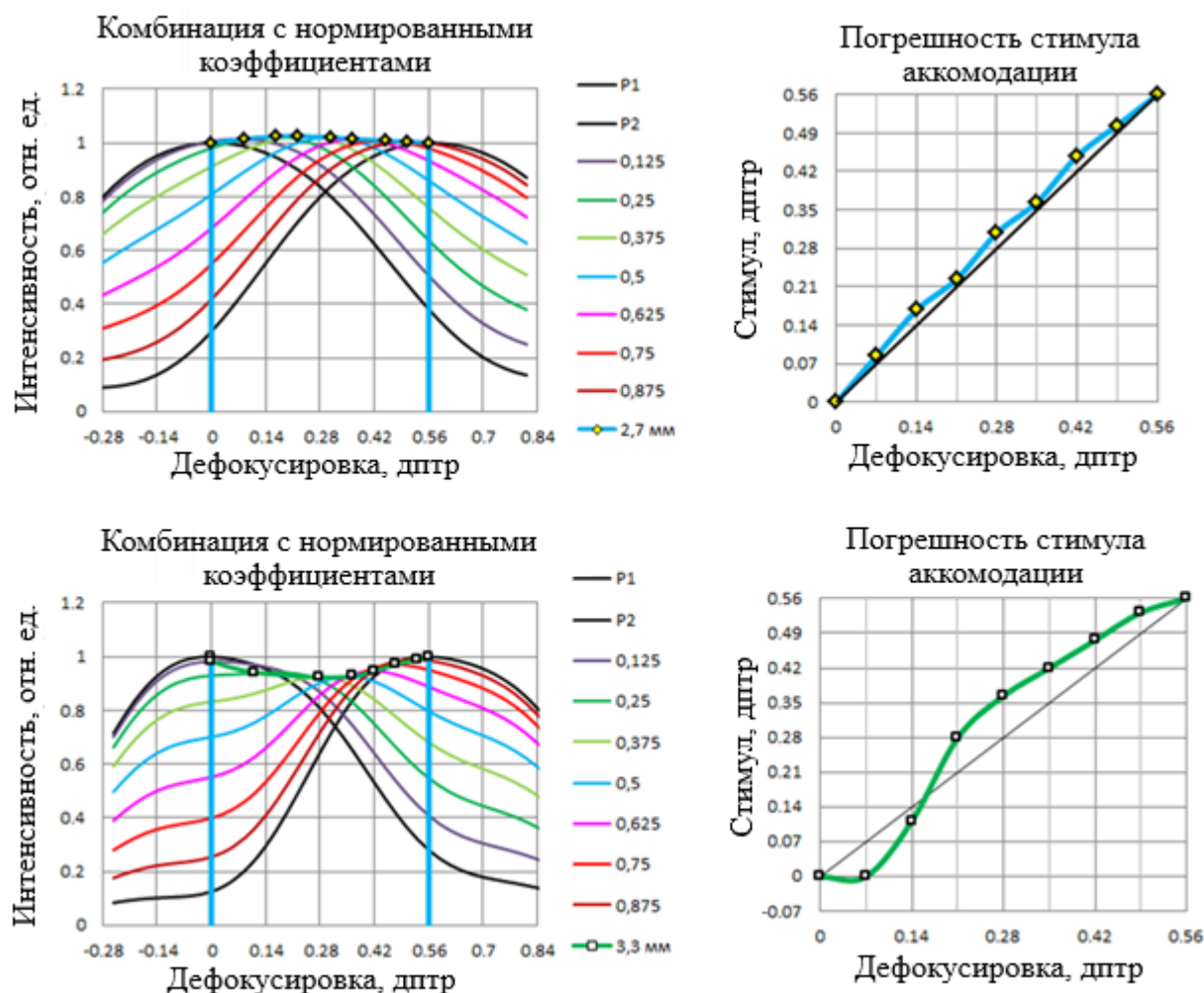


Рисунок 28 – Оптимизация на зрачках с диаметрами 2,7 мм и 3,3 мм

Как видно из представленных выше графиков такая оптимизация приводит к небольшим провалам контраста и отклонению стимула аккомодации от идеального линейного. Для наглядности погрешности отражены на рисунке 29.

Поскольку нормализация комбинаций для зрачков 2,7 и 3,3 мм выполнялась с коэффициентами, рассчитанными для зрачка 3 мм (основная настройка), левый график показывает, по-существу, изменение контраста при изменении освещённости зрачка.

На правый график это никак не влияет.

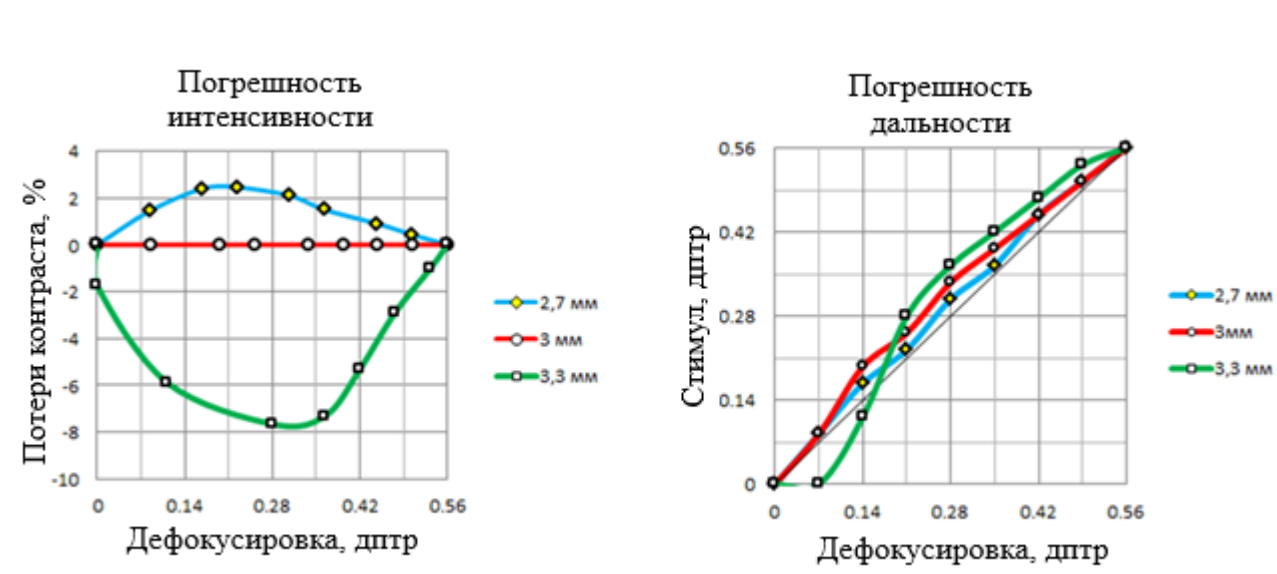


Рисунок 29 – Погрешности оптимизации

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.

Выводы главы 3

В данной главе приведен способ повышения контраста комбинированных изображений в трехмерных дисплеях. Приведены результаты использования коэффициентов нормирования комбинаций планов-изображений. Что несомненно улучшает правильность аккомодирования глаза на скомбинированное изображение в пространстве.

Глава 4 Исследование способов формирования трехмерного изображения с добавленной аккомодацией

Технические характеристики, комфортность восприятия и возможная интерактивность реальных и виртуальных предметов среды во многом зависят 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.

4.1 Светоделительные элементы

В качестве прототипа для исследования способа построения на светоделительных элементах рассмотрены две системы. Бифокальный объемный стереоскопический дисплей разработан в 2010г в КТИ НП СО РАН [36, 46]. На рис. 30 приведен состав экспериментального образца.

Данный дисплей является разновидностью дисплеев иммерсивного типа. Изображения с двух микродисплеев, пройдя через светоделительный кубик и окуляр, попадают на сетчатку человеческого глаза. Объемность изображения достигается за счет стереоизображения и разноудаленных от светоделительного кубика микродисплеев.

Явным недостатком дисплеев, построенных на данном принципе, является ограниченное число планов, не более двух. 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 [29] вносят свои изменения в формулу построения изображений для ближнего и дальнего планов. На основе этих данных оптимальным межплановым

расстоянием является значение 0,6 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.

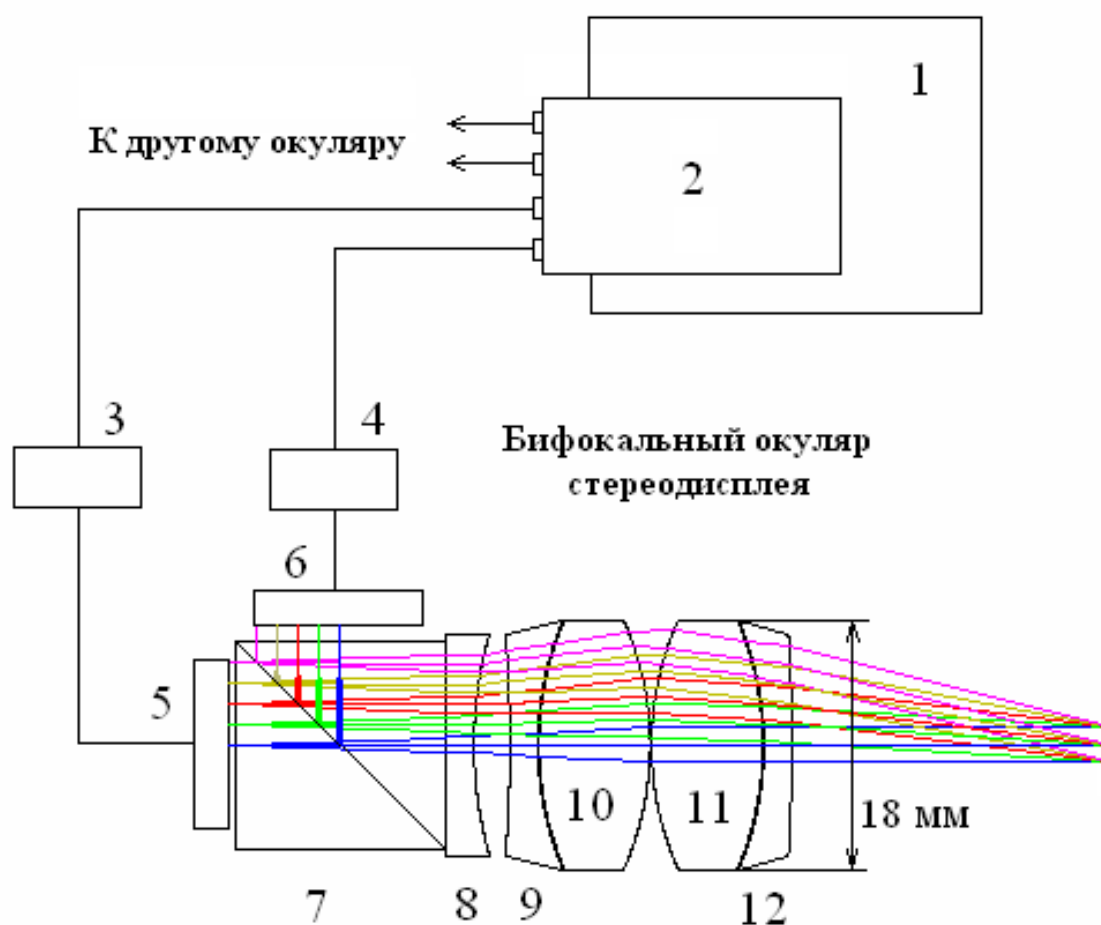


Рисунок 30 – Состав экспериментального образца (монокулярный вариант) 1 – Компьютер (Intel Core 2 Quad QS400). 2 – Видеокарта (ATI Radeon HD 5870, 2 Gb). 3, 4 – Компьютерный интерфейс (KIT, 2 шт.). 5, 6 – Микродисплеи (eMagin OLED SVGA+, 2 шт.). 7 – Светоделительный кубик (K8, сторона –17 мм). 8, 9, 12 – Отрицательные линзы (TF2, 3 шт.). 10, 11 – Положительные линзы (TK16, 2 шт.)

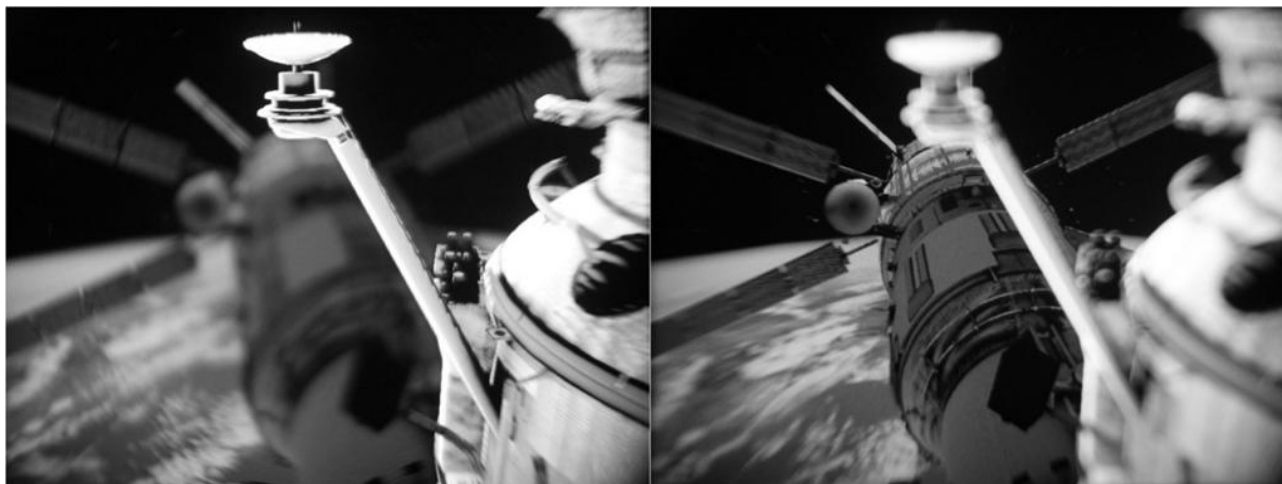
Второй недостаток в данном способе построения изображения вытекает из-за непреклонного правила; для того, чтобы построить один план-изображение, требуется один микродисплей (т.е. для построения бипланового дисплея требуется 4 микродисплея, по 2 на каждый глаз), что существенно увеличивает стоимость такого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

В целом, даже с учетом данных недостатков, система позволяет построить качественное объемное изображение и удовлетворяет поставленным задачам коллаборации в выбранном интервале объема глубины (для различных целей выбирается нужный интервал).

Учен проведенный дифракционный анализ пиксельных изображений, определены количественные характеристики дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности и диаметра зрачка глаза. А также рассчитаны и устранены потери контраста, которые вносят свой вклад в формулу построения изображений для ближнего и дальнего планов.

Все это позволило создать качественное объемное изображение с согласованными стимулами аккомодации и конвергенции глаз.

С целью выявления соответствия дисплея естественному зрительному восприятию были проведены соответствующие эксперименты (см. фотографии рис.31). На рис. 31а фокус фотоаппарата выставлен на 1м, соответственно на полученной фотографии объекты, на переднем плане, резкие, а на заднем плане размыты. На рис. 31б 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 и соответствует естественному зрительному восприятию человека.



а

б

Рисунок 31 – Изображения полученные фотоаппаратом с одного окуляра:

а) фокус фотоаппарата выставлен на 1м, б) фотоаппарат сфокусирован на бесконечность

4.2 Активные оптические элементы

В качестве примера использования активных оптических элементов представлен патент 3-Dimensional electro-optical see-through displays/Pub.No: US 2011/0075257 A1 Pub. Date: Mar. 31, 2011 Applicants: Hong Hua, Tucson, AZ (US), Sheng Liu, San Jose, CA(US) [47]. На рис. 32 изображена оптическая схема такого 3D дисплея. Активный оптический элемент расположен между глазом и источником изображения, который оптически сопряжен с входным зрачком. Элемент имеет варьируемую оптическую силу: за счет управления ей можно построить несколько мнимых изображений на разных расстояниях. Отразившись от сферического зеркала и от светоделительной пластины, изображение попадает на сетчатку глаза.

Дисплеи, использующие активные оптические элементы, могут быть как просветного, так и иммерсионного типа, в зависимости от поставленных требований и задач. Просветная среда также позволяет зрителю видеть реальные объекты, как и ретрорефлективная, и так же обеспечивает естественное когнитивное зрительное восприятие реальных предметов.

Преимуществом такого типа дисплеев над дисплеями, основанными лишь на светоделительных элементах, является возможность построения большего числа планов-изображений и, соответственно, большего объема глубины изображаемого пространства. В этом случае требуется меньшее количество микродисплеев: по одному на каждый глаз.

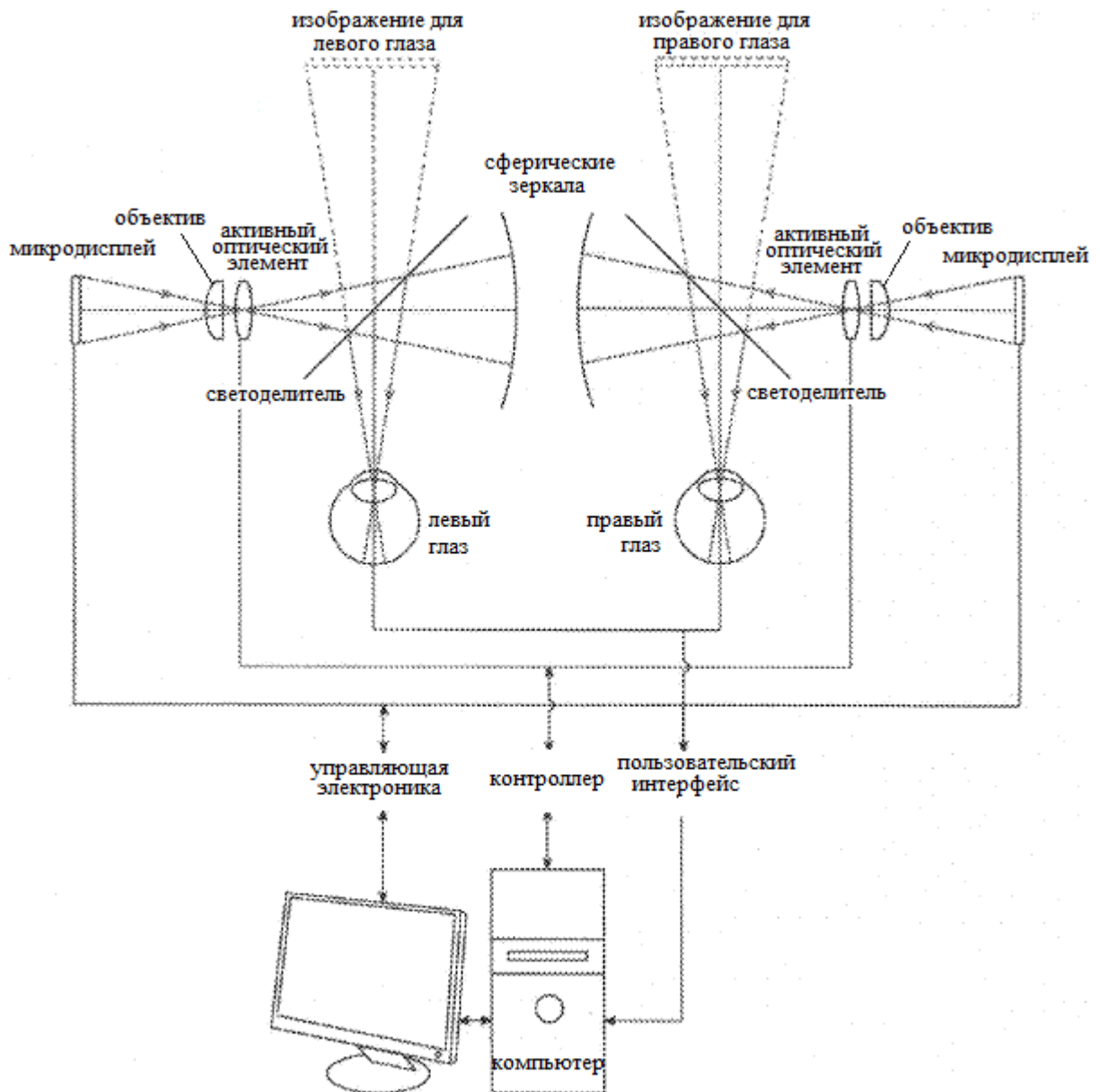


Рисунок 32 – Схема 3D дисплея с использованием активных оптических элементов.

Ограничение на количество планов в таких 3D дисплеях накладывают 2 компонента: это микродисплеи и сами активные оптические элементы. К примеру, чтобы построить 6 планов изображений и сформировать глубину пространства от 0 дптр (бесконечность) до 3 дптр (33см) предъявляются требования к частоте работы микродисплея и жидких линз минимум 360 Гц. Это позволяет получить стабильное изображение с частотой 60Гц. Так как микродисплеи типа OLED под данные критерии не укладываются, то приходится использовать более дорогие дисплеи, к примеру 0.7" XGA DMD (VisitechLuxbeam 4500 DLP board) фирмы Texas Instruments (<http://www.ti.com/product/dlp7000>). Проблему с диоптрийной частотой переключения можно решить использованием нескольких активных оптических элементов [48], как это показано на рис. 33. Использование 2х жидких линз в каждом монокуляре позволяет получить 4 плана изображения. Так же возможно использование активных оптических элементов, позволяющих более 2х вариантов изменения своей оптической силы.

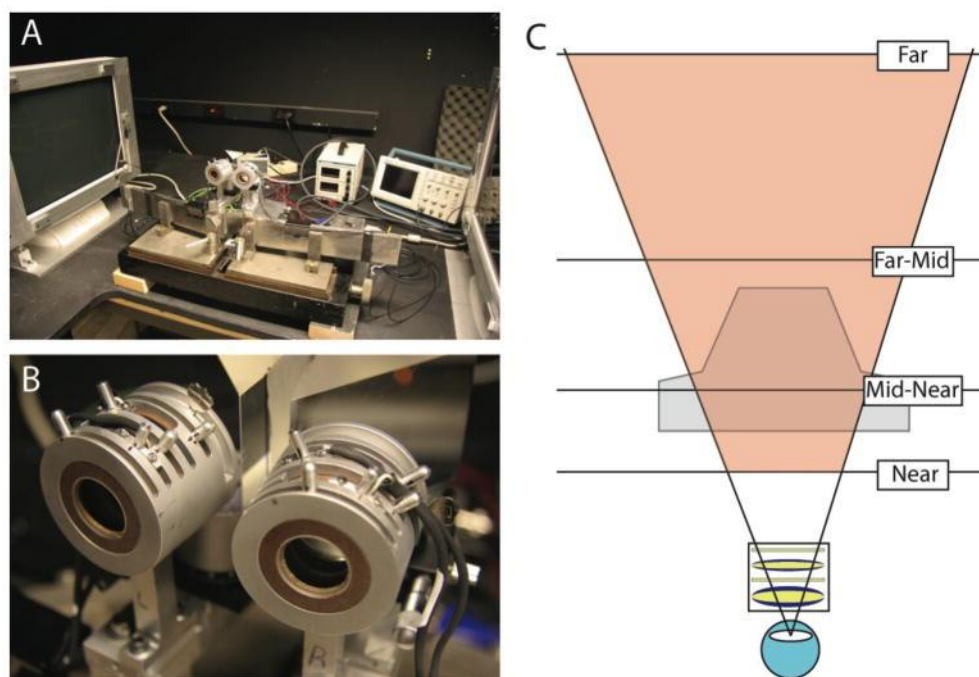


Рисунок 33 – Четырехплановый 3D дисплей на жидких линзах.

Разработка такого типа дисплеев требует более сложного расчета оптической схемы, а также применение жидких линз вносит свои недостатки, такие, как аберрации оптической системы. Качество изображения ухудшается. И чем больше количество планов мы строим, тем сильнее это заметно для человеческого глаза.

4.3 Вращатели поляризации, двулучепреломляющие кристаллы

В качестве альтернативного способа построения многопланового 3D дисплея предложено использовать поляризационные методы, основываясь на двойном лучепреломлении некоторого вида кристаллов. Одним из примеров таких кристаллов является кальцит CaCO_3 , с разными показателями преломления для разнополяризованной волны: $n_o = 1,640\text{—}1,660$ и $n_e = 1,486$. Кальцит - прозрачный материал, из которого можно изготавливать оптические элементы с высоким светопропусканием, так же у него большая разница в показателях преломления. На основе этого свойства в программной среде Zemax была рассчитана оптическая схема 3D дисплея. На рис. 34 представлен четырехплановый вариант дисплея, с возможностью выбора и переключения положения планов. Между оптических элементов из кальцита установлены вращатели поляризации, переключением которых меняется положение фокуса. Также в оптической схеме присутствует линза, смещение которой обеспечивает переключение фокусировки в двух разных исполнениях «Близь» и «Даль». Трехмерный объем формируемый окулярами при фокусировке «Близь» позволяет оператору работать на расстояниях «вытянутой руки», фокусировка «Даль» обеспечивает объемное пространство на более дальних расстояниях, вплоть до бесконечности. На рис. 35 представлен график пространственной частоты для двух вариантов переключения фокуса. Первый вариант предусматривает объемную среду «Близь» с планами, расположенными на расстояниях 29,3 см (3,4 дптр), 37 см (2,7 дптр), 50,3 см (1,98 дптр), 78 см (1,28 дптр) и 2й вариант - «Даль» - с положениями планов-изображений на

расстояниях 47 см (2,12 дптр), 70 см (1,42 дптр), 1,4 м (0,71 дптр), бесконечность (0 дптр). Межплановое расстояние 0,7 дптр взято на основе расчета дифракционной глубины 3D изображений, стимулирующих аккомодацию глаза [23].

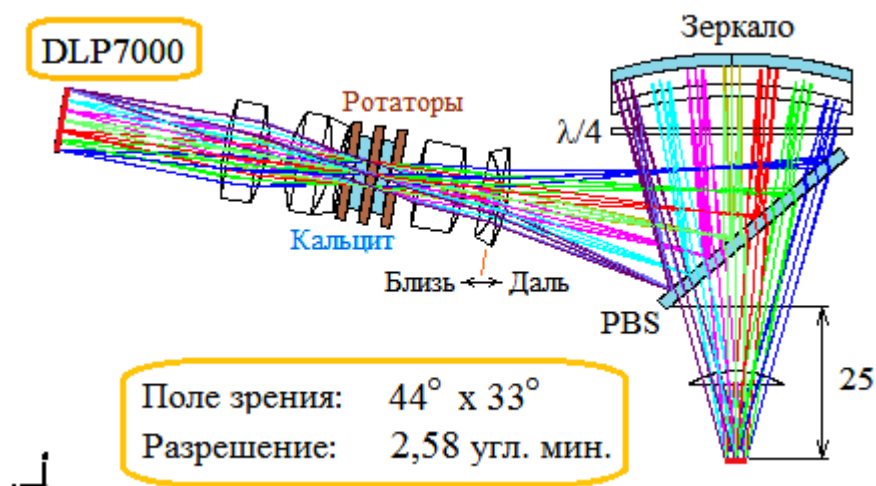


Рисунок 34 – Расчет оптической схемы с использованием вращателей поляризации и CaCO_3 .

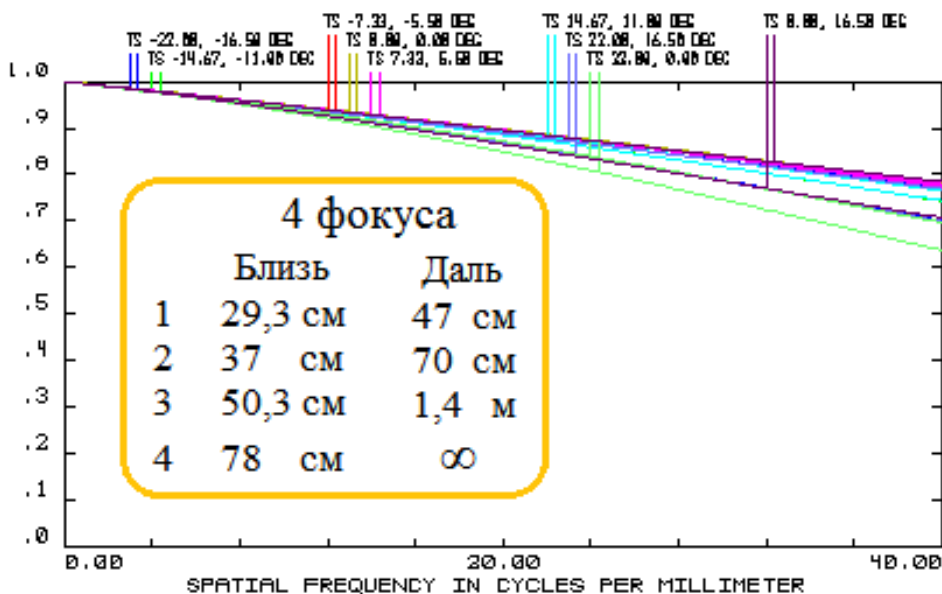


Рисунок 35 – Пространственная частота в циклах на миллиметр.

На рисунке 36 и 37 представлены диаграмма пятен рассеяния и графики кривизны для всех конфигураций. Видно, что максимальное ухудшение изображения возникает на краях поля зрения. Максимальный радиус пятна

рассеяния (RMS radius) составляет 6,3 мкм. Дисторсии порядка 1%, кривизна поля не более 0,2 мм.

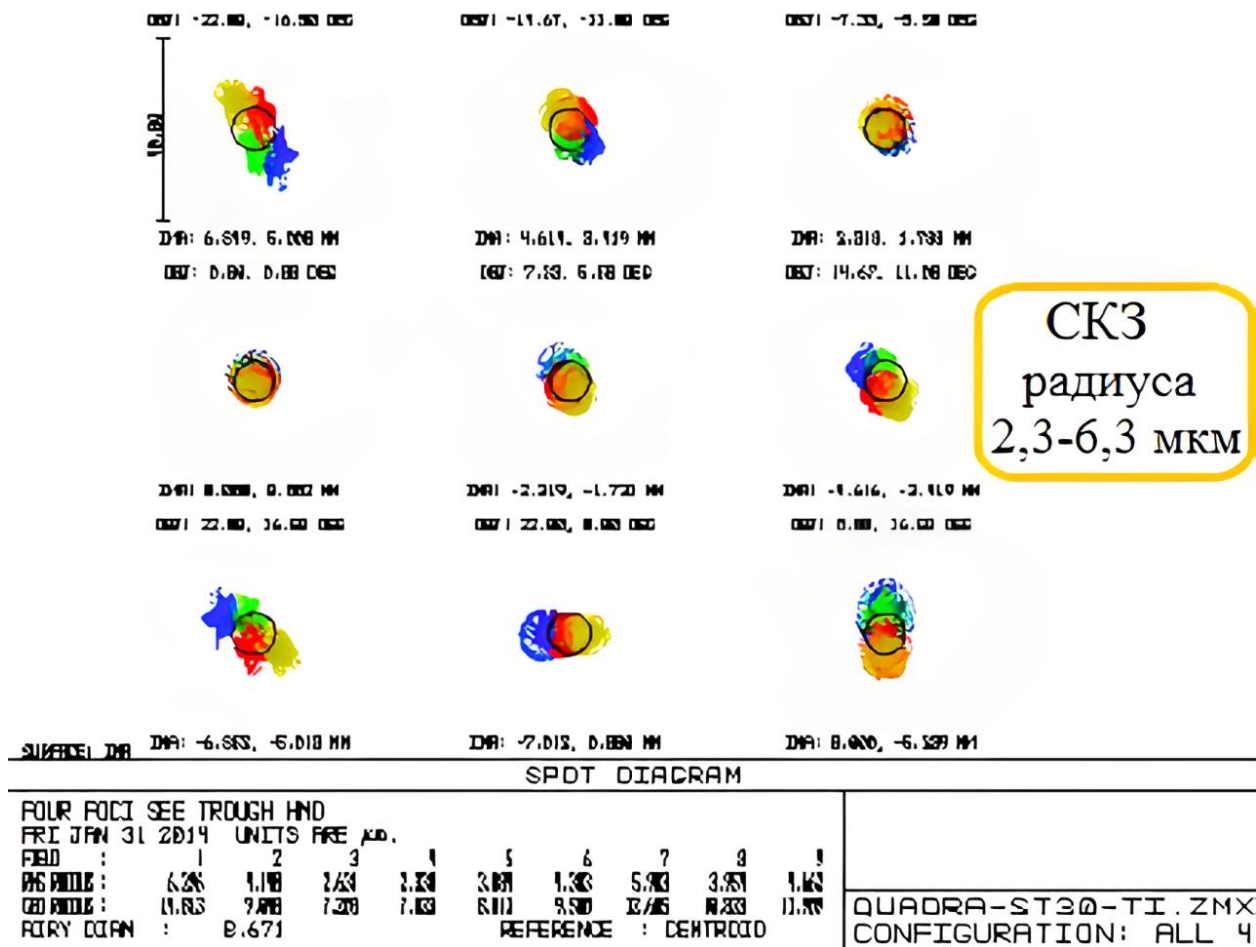


Рисунок 36 – Диаграмма пятен рассеивания.

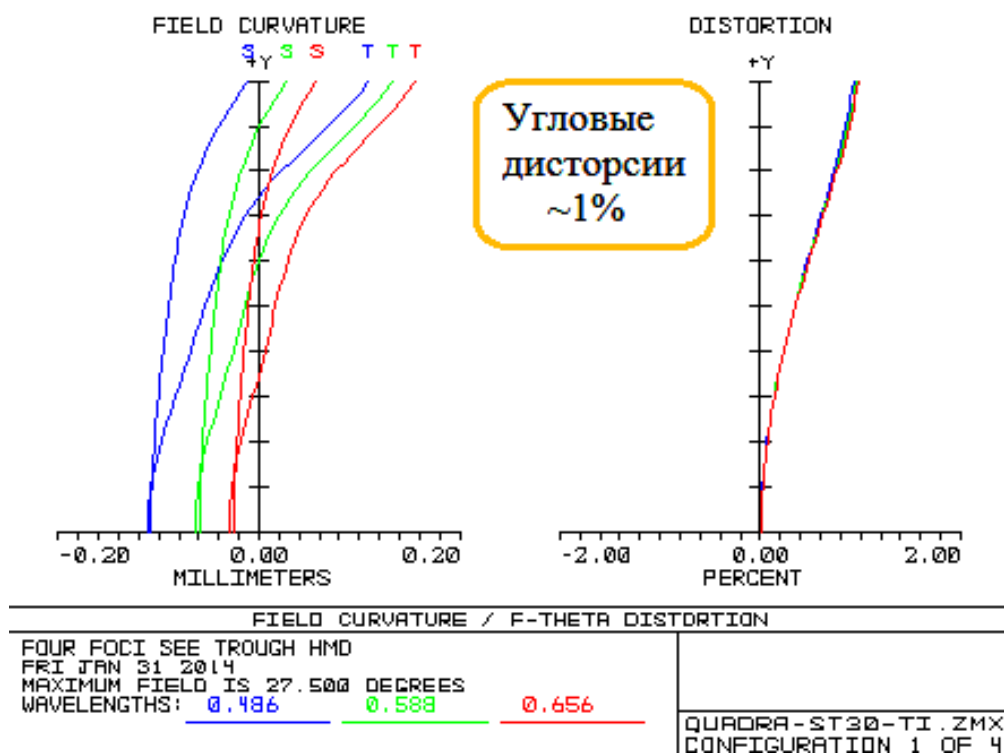


Рисунок 37 – Графики кривизны поля зрения.

Предлагаемая технология не имеет таких сильных aberrаций, как при использовании жидких линз, однако так же позволяет строить многоплановые изображения, используя минимум компонентов, таких, как микродисплеи. Основной задачей при создании многоплановых изображений являются поставленные высокие требования к частоте и яркости микродисплеев. Расчет оптических схем показал, что светопотери такого типа дисплеев составляют около 90-95%. В следующей главе будут описаны схемы поляризационных проекционных дисплеев для ретрорефлективной виртуальной среды.

4.4 Расчет схем поляризационных проекционных наголовных дисплеев

Технические характеристики, комфортность восприятия и возможная интерактивность реальных и виртуальных предметов среды во многом зависят от вида дисплея персонального пользования. При построении систем многоплановых изображений рассчитывались и исследовались оптические схемы с применением двух типов микродисплеев:

– FLCOS микродисплеи (ferroelectric liquid crystal on silicon), основанные на технологии жидких ферроэлектрических кристаллов на кремнии, где кристалл, управляющий дисплеем, содержит схемы памяти, обработки изображения и управления подсветкой и отличается низким потреблением (не более 85 мВт);

– DMD микродисплей (Digital Micromirror Device), это микроэлектромеханическая система, которая создаёт изображение микроскопическими зеркалами, расположенными в виде матрицы на полупроводниковом чипе.

Данные технологии обеспечивают высокую скорость переключения, что необходимо при построении многоплановых изображений с количеством планов от 4.

Далее описаны оптико-информационные системы коллаборации на основе стереоскопических виртуальных сред ретрорефлективного и иммерсивного типа. Такие системы дают возможности:

а) видеть виртуальную среду каждому из пользователей при помощи наголовных дисплеев в индивидуальной перспективе;

б) иметь равный и естественный доступ к выполняемой визуальной задаче;

в) воспринимать присутствие в среде реальных предметов и локальных коллаборантов;

г) осуществлять коммуникацию вербальным и невербальным способом. Концепция просветной среды возникла в качестве альтернативы ретрорефлективным средам, которые трудно реализовать из-за отсутствия материалов для получения оптических изображений высокого качества. Просветная среда также позволяет зрителю видеть реальные объекты, как и ретрорефлективная, и также обеспечивает естественное когнитивное зрительное восприятие реальных предметов.

На рисунках 38, 39, 40 приведены четырехплановые окуляры рассчитанные с использованием FLCOS микродисплеев, с возможностью выбора и переключения положения планов, а так же с линзой для диоптрийной перестройки. Рассчитаны несколько вариантов диоптрийной глубины для объемной среды. Планы изображения, расположены на расстояниях – 35,8 см (2,79 дптр), 50см (2 дптр), 81,4 см (1,23дптр), 233см (0,43дптр). Межплановое расстояние порядка 0,8дптр взято на основе расчета дифракционной глубины 3D изображений, стимулирующих аккомодацию глаза [40]. Дисплейная часть схем содержит два микродисплея FLCOS типа для воспроизведения виртуально-реальной сцены, мультифокальный проекционный объектив с поворотным зеркалом, светоделительную пластину и непрозрачное вогнутое зеркало, проецирующее комбинированную сцену через входной зрачок в глаз наблюдателя. Дисторсионные искажения не превышают 5 %, в том числе и в вариантах включающих в себя линзу для диоптрийной перестройки.

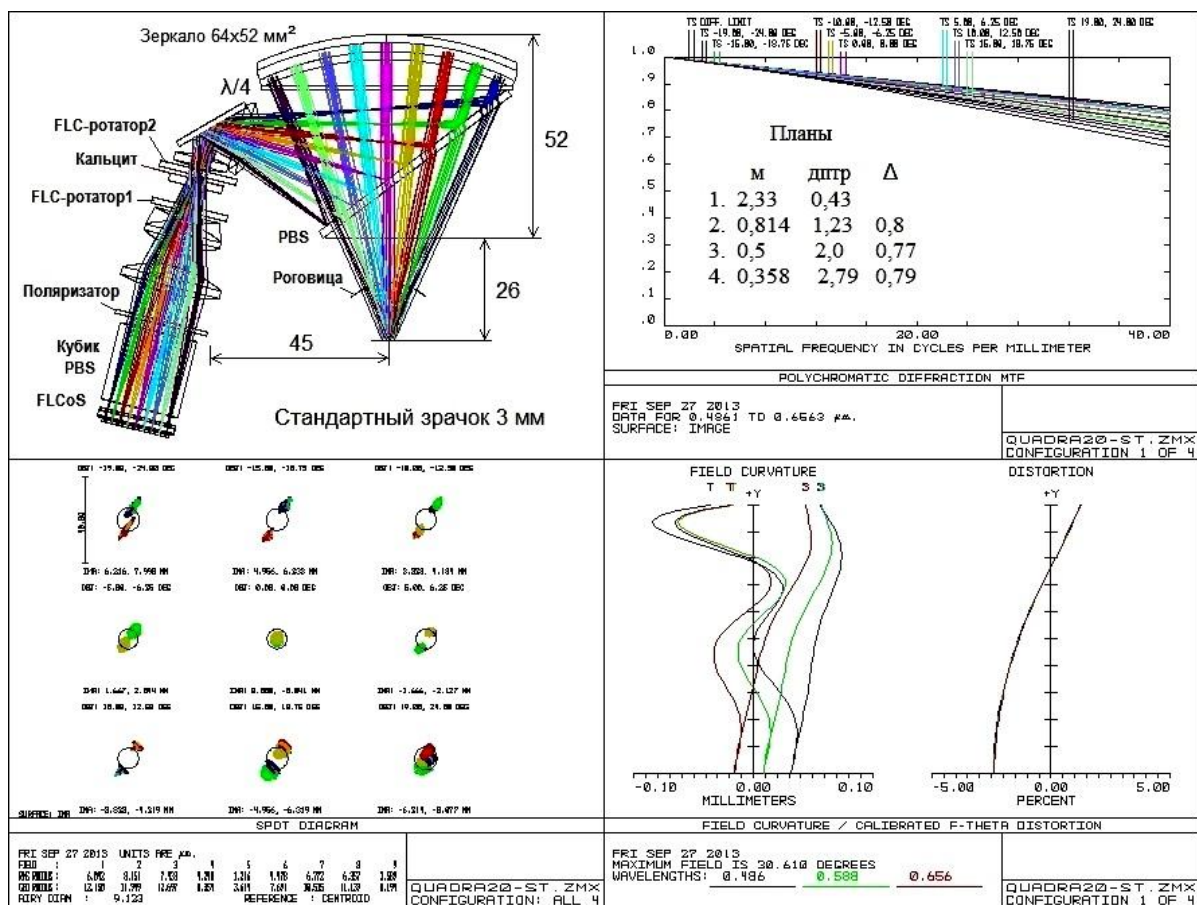


Рисунок 38 – Четырехплановый окуляр без диоптрийной перестройки

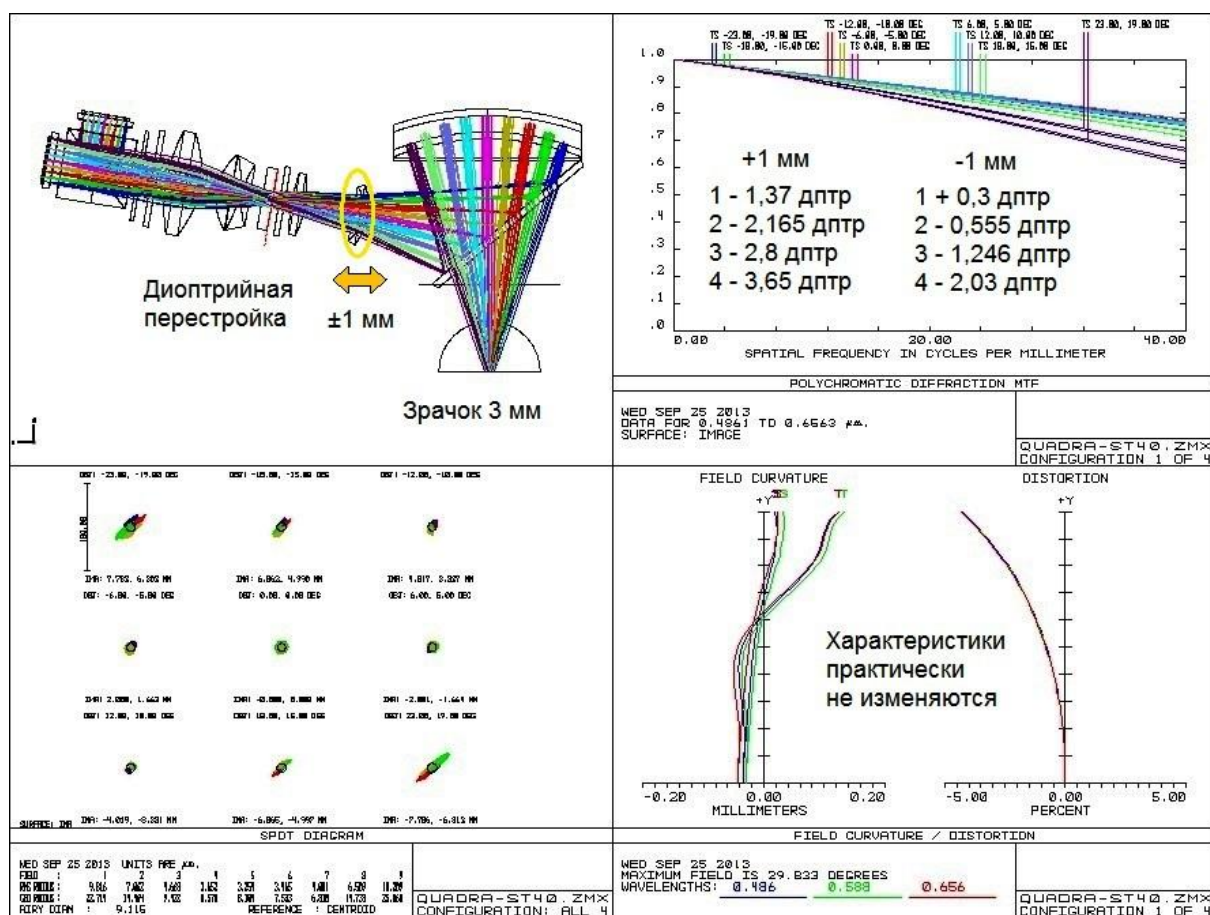


Рисунок 39 – Четырехпланный окуляр с линзой диоптрийной перестройки

На рисунке 41 показаны четыре схемы просветного наголовного дисплея, содержащие микродисплей для воспроизведения виртуальной сцены, проекционный объектив с поворотным зеркалом и зеркальный окуляр. Окуляр состоит из светоделительной пластины и полупрозрачного вогнутого зеркала, проецирующего виртуальную сцену через выходной зрачок в глаз наблюдателя.

Поскольку светоделитель и вогнутое зеркало полупрозрачные, то наблюдатель легко видит и реальные предметы окружающей обстановки. Но в отличие от ретрорефлективной среды непрозрачные предметы не могут выполнять функцию автоматической окклюзии, т.е. закрывать следующие за ними по глубине виртуальные предметы. Таким образом, в традиционных просветных дисплеях главный *косвенный* стимул глубины предметов теряется.

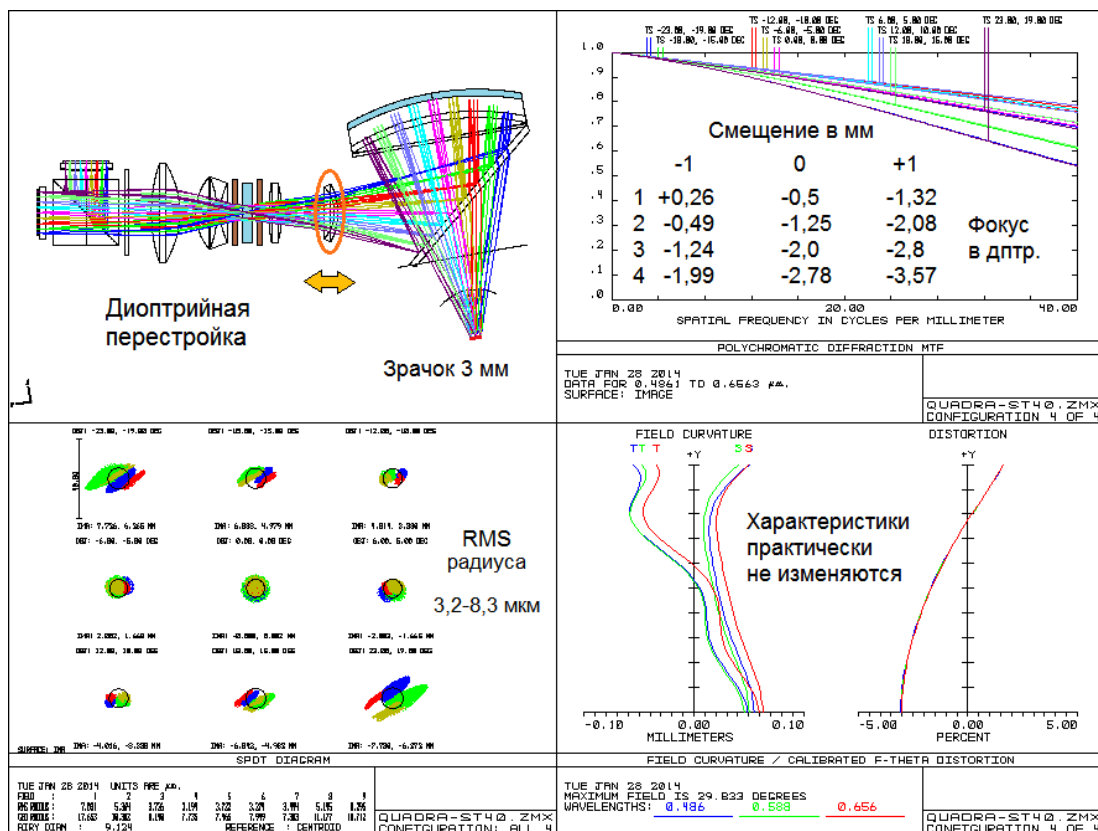


Рисунок 40 – Четырехпланный окуляр с линзой диоптрийной перестройки

Во всех вариантах ранее предложено использовать поляризационные методы, основываясь на двойном лучепреломлении некоторого вида кристаллов. Одним из примеров таких кристаллов является кальцит CaCO_3 , с разными показателями преломления для разнополяризованной волны: $n_o = 1,640\text{--}1,660$ и $n_e = 1,486$. Кальцит – прозрачный материал, из которого можно изготавливать оптические элементы с высоким светопропусканием, так же у него большая разница в показателях преломления. Все варианты оптических схем мультифокальных дисплеев были рассчитаны с использованием программного обеспечения Zemax. Рассчитаны два варианта объемной среды. Первый вариант предусматривает объемную среду «Близь» с планами, расположенными на расстояниях 29,3 см (3,4 дптр), 37 см (2,7 дптр), 50,3 см (1,98 дптр), 78 см (1,28 дптр) и 2й вариант – «Даль» – с положениями планов-изображений на расстояниях 47 см (2,12 дптр), 70 см (1,42 дптр), 1,4 м (0,71 дптр), бесконечность (0 дптр).

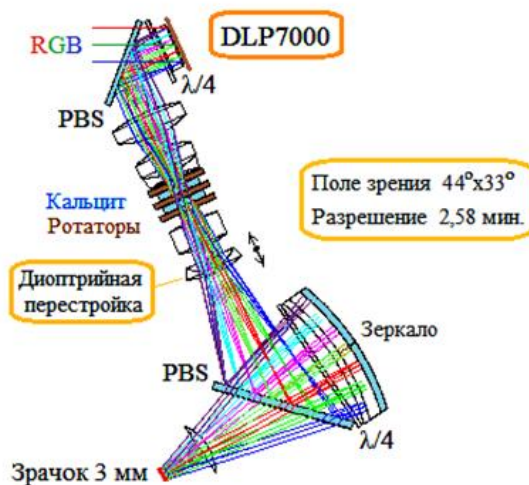
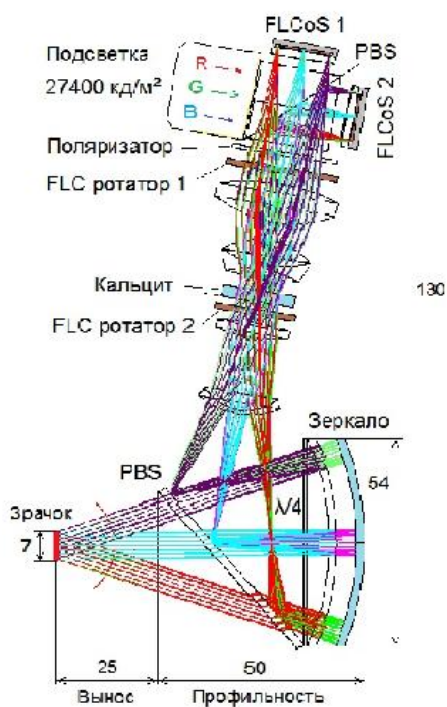
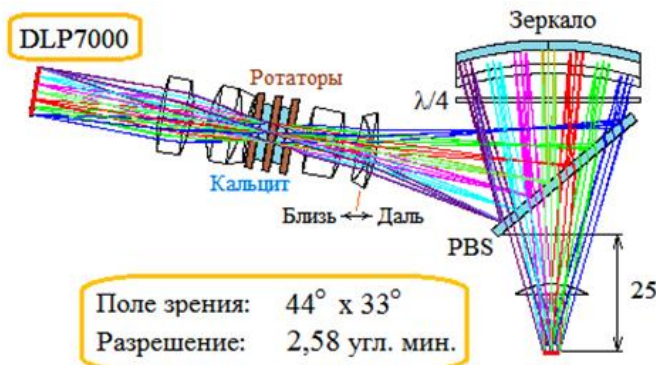
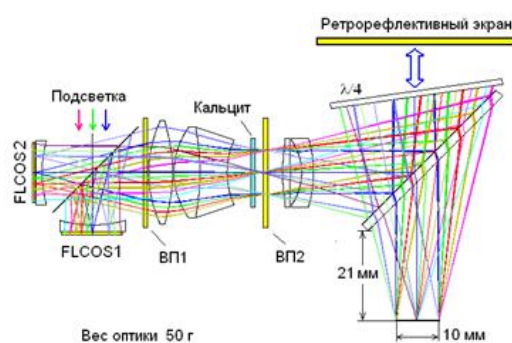


Рисунок 41 – Четырехпланные дисплеи с использованием FLCOS и DMD микродисплеев

Предлагаемая технология не имеет таких сильных aberrаций, как при использовании жидких линз, однако так же позволяет строить многоплановые изображения, используя минимум компонентов, таких, как микродисплеи. Основной задачей при создании многоплановых изображений являются поставленные высокие требования к частоте и яркости микродисплеев. Расчет оптических схем показал, что светопотери составляют около 90–95 %. При разработке окуляров с использованием FLCOS и DMD микродисплеев данная проблема рассмотрена подробнее в следующей главе.

4.4 Уменьшение светопотерь и увеличение углов поля зрения в многоплановых 3D дисплеях

Для решения этой задачи были рассмотрены существующие методы подсветки микродисплеев DMD типа. Основной отличительной особенностью данного микродисплея является то, что микрозеркала колеблются по диагонали пиксела 45° (Положение «On» и положение «Off»).

На рисунке 42 приведена схема с использованием призмного светоделиителя с обратным полным внутренним отражением (RTIR) как описано в патенте US 5309188 [48]. DMD дисплей и проектор повернуты на 45° относительно граней клина 20. Основным преимуществом является уменьшение поля подсветки по сравнению с использованием призмных светоделиителей с полным внутренним отражением (TIR).

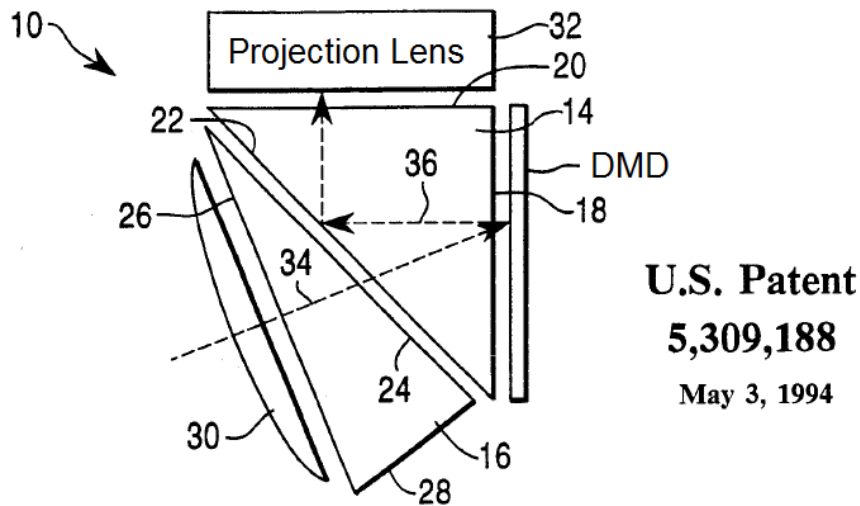


Рисунок 42 – Обратное полное внутреннее отражение RTIR

На рисунке 43 приведена схема подсветки с пластиной по схеме полного внутреннего отражения TIR [49]. Основными недостатками такой схемы

являются требования большой апертуры поля подсветки, а так же входящий в aberrации дисплея астигматизм плоскопараллельной пластинки.

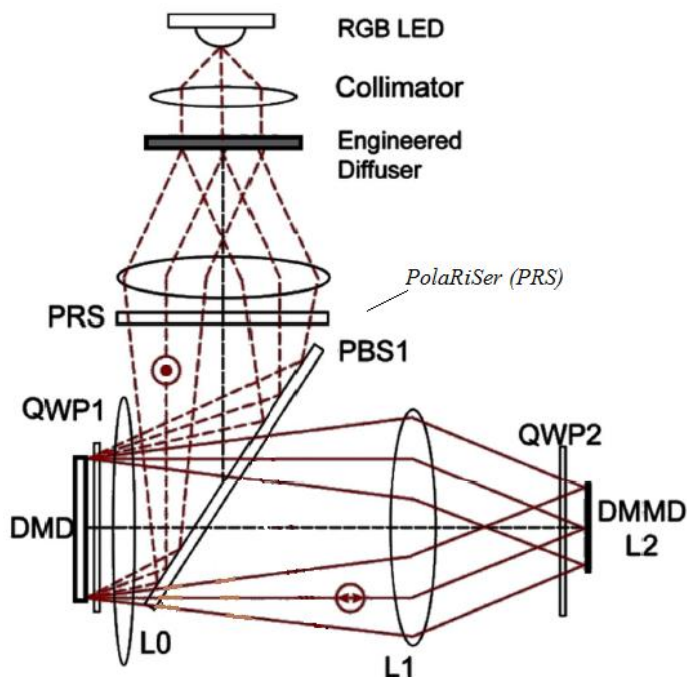


Рисунок 43 – Полное внутреннее отражение с использованием светоделительной пластины

На основе этих двух методов произведен расчет подсветки с использованием светоделительной пластинки с обратным полным внутренним отражением. Преимуществом данного типа подсветки является сохранение достоинств схемы RTIR – малое поле подсветки. А так же отсутствие влияния астигматизма светоделительной пластинки PBS на aberrации дисплея и простая реализация схемы рисунок 44.

Для схем наголовных дисплеев иммерсивной и просветной виртуальной сред, рассчитаны мультифокальные окуляры. На рисунке 45 приведен вариант четырехпланового дисплея, рассчитанный с использованием FLCOS микродисплеев, с возможностью выбора и переключения положения планов. С использованием программного обеспечения ZEMAX рассчитаны несколько вариантов диоптрийной глубины для объемной среды. Планы изображения,

расположены на расстояниях 35,8 см (2,79 дптр), 50 см (2 дптр), 81,4 см (1,23 дптр), 233 см (0,43 дптр).

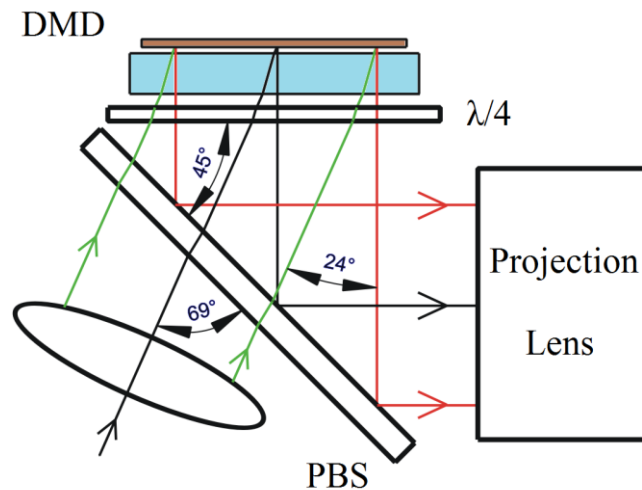


Рисунок 44 – Обратное полное внутреннее отражение с использованием светоделительной пластинки

Дисплейная часть схем содержит два микродисплея FLCOS типа, для воспроизведения виртуально-реальной сцены, мультифокальный проекционный объектив со светоделительным кубиком, светоделительную пластину и полупрозрачное вогнутое зеркало, проецирующее комбинированную сцену через входной зрачок в глаз наблюдателя. Дисторсионные искажения не превышают 5 %, в том числе и в вариантах, включающих в себя линзу, для диоптрийной перестройки. Угол поля зрения составляет $44^\circ \times 33^\circ$ и по диагонали 55° (FOV), что является на данном этапе довольно скромным значением, по сравнению с однофокальными стерео дисплеями, у которых этот параметр порядка 60-100°.

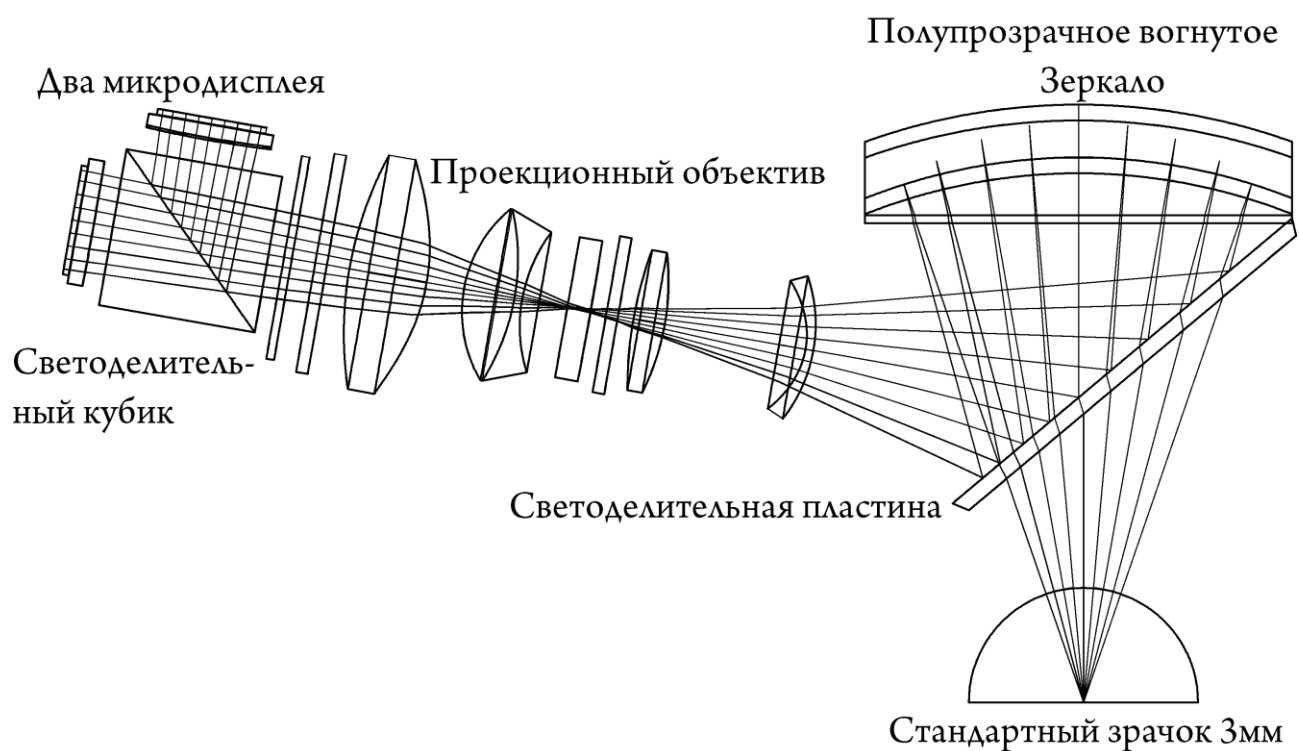


Рисунок 45 – Четырехплановый мультифокальный дисплей

В мультифокальных дисплеях такое преимущество, как возможность видеть в объёме одним глазом позволяет построить широкоформатное 3D изображение, не меняя форматов левого и правого окуляров. Рисунок 46 – это изображение на «бесконечности».

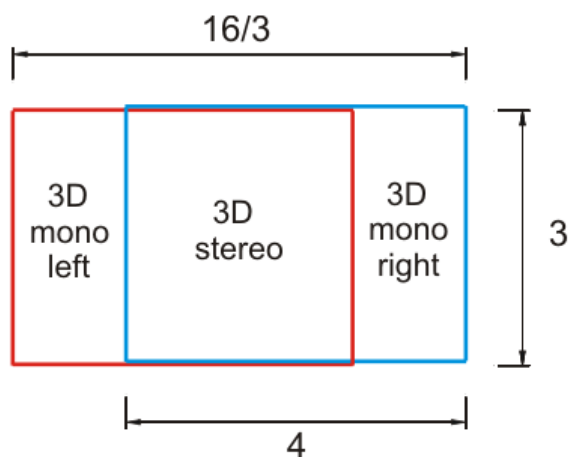


Рисунок 46 – Изображение стереодисплея

Пусть исходный формат матриц 4×3 , или 800×600 пикселей, это самая простая матрица, на сегодняшний день доступны матрицы с разрешением порядка 1920×1200 . 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 пятнадцатиградусную добавку 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° .

Заметим, что в традиционных 3D дисплеях при таких манипуляциях по краям будут оставаться 2D изображения, однако же в мультифокальных дисплеях, при таком подходе, изображения и по краям останутся объемными.

Чтобы проверить это на практике, нужны небольшие добавления в программное обеспечение. На рисунке 47 показано, что оптические оси окуляров Z_L и Z_R должны быть не только смещены в центрах L и R на глазную базу b , но и повернуты на угол ω по часовой стрелке для правого глаза и против часовой – для левого. В нашем случае, для формата 16×9 $\omega = 4^\circ 40'$, для 2×1 $\omega = 7^\circ$.

Плоскости Z_0 , Z_n , Z_f , как и обычно, перпендикулярны осям Z_L и Z_R . Поэтому в системе координат глаза алгоритмы не изменяются.

Заметим, что возникают скрещенные оси X_L , X_R и, как следствие, скрещенные плоскости Z_0 , Z_n , Z_f . Для обычного 3D возникает проблема диплопии. В мультифокальных дисплеях при данном повороте оптических осей такая проблем отсутствует, так как каждый глаз получает стимулы фокусировки.

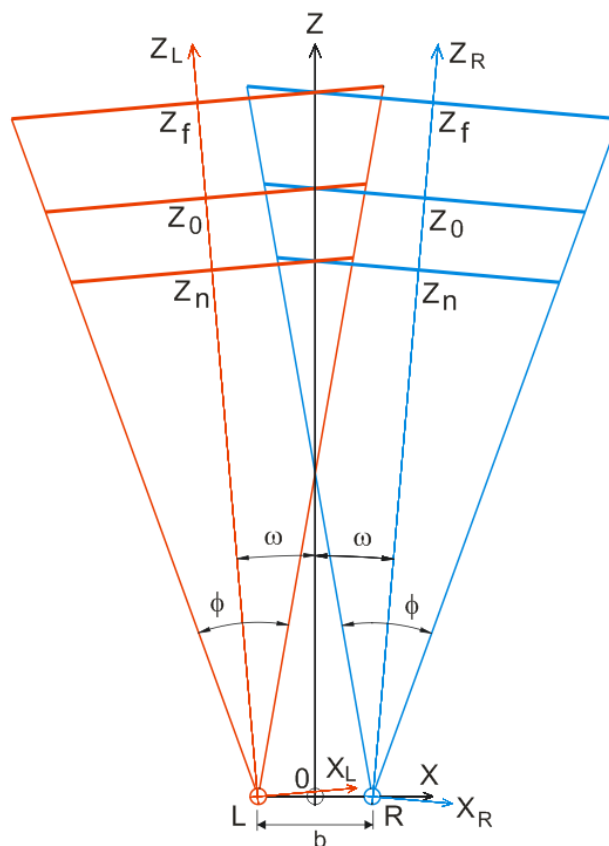


Рисунок 47 – Поворот оптических осей

Выводы главы 4

В данной главе отображены 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.

Глава 5 Экспериментальное исследование визуального восприятия пространства человеком в мультифокальных 3D дисплеях

Визуальное восприятие пространства можно рассматривать, как способность человека воспринимать пространственное расположение объектов в визуальном мире. Это сложный навык, который обеспечивает безопасную ориентацию в физической среде, позволяет обнаруживать и распознавать направление и расположение объектов в отношении наблюдателя или друг относительно друга. Он также позволяет воспринимать абсолютные и относительные размеры и расстояния объектов с использованием разнообразных визуальных сигналов. Восприятие расстояния человеком основывается на признаках глубины. Прямые признаки глубины стимулируют аккомодацию глаз, их конвергенцию и стереоскопическую диспаратность [54].

Косвенные признаки глубины включают в себя окклюзии и автоокклюзии, многовариантную перспективу, изменение контраста и градиента структуры, двигательный параллакс и др [55]. Эта оценка человеком происходит постоянно, когда он неподвижен и в более сложных ситуациях, когда наблюдатель движется по визуальному миру, содержащему неподвижные и движущиеся объекты. В нормальных условиях человек достаточно точен в определении направлений, расстояниях и размерах объектов, а также при маневрировании или управлении транспортными средствами. В условиях ухудшения визуальных условий из-за неблагоприятной погоды или низком уровне освещенности могут возникать ошибки в пространственных суждениях. Восприятие визуальной среды также может ухудшаться при просмотре через различные устройства наблюдения, например, через телескопы, перископы, бинокли, которые сильно ограничивают поле зрения, тем самым скрывая периферийное поле зрения, также как и изображения с удаленных видеокамер и датчиков, представленные на дисплее, теряют множество мелких подробностей. Такие факторы могут снизить информационный контент визуальной сцены по сравнению с прямым просмотром человеком при нормальных условиях окружающей среды.

В настоящей диссертации 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. Хотя наблюдатель не может явно оценить размер или расстояние просматриваемого объекта в физических единицах, но он вполне может сравнивать их с эталонным объектом.

5.1 Формирование константности зрительного восприятия у наблюдателя

Предполагается, что воспринимаемый размер объекта основывается на образуемом им угловом размере на сетчатке наблюдателя. Расстояние до объекта и его фактические размеры влияют на его воспринимаемый размер. Закон угла поля зрения предсказывал, что оценка размера объекта будет основана исключительно на образуемым им углом обзора. Холуэем и Борингом, показано, что воспринимаемый размер объекта зависит не только от размера изображения, которое он проецирует на сетчатке, но и от расстояния до него [56]. Изображение объекта заданного размера на фиксированном расстоянии проецируемое на сетчатку всегда остается неизменным. Когда расстояние наблюдения до объекта уменьшается, его изображение на сетчатке увеличивается, но при этом наблюдатель не считает, что объект становится более крупным. Например, мишень диаметром 1 м с расстояния 10 м будет казаться примерно того же размера, что и при просмотре с 20 м, несмотря на то, что мы угол поля зрения уменьшили в два раза. Визуальный опыт наблюдателя состоит в том, что мишень не становится вдвое меньше на дальнем расстоянии, а остается примерно такого же размера. На любом расстоянии мишень остается для наблюдателя более или менее того же размера; восприятие почти постоянного размера сохраняется в отличие от того, что размер изображения на сетчатке глаза изменяется очень сильно.

5.2 Описание разработанного мультифокального 3D дисплея

Кардинальным решением проблемы между аккомодацией и конвергенцией глаз в 3D дисплеях является обеспечение соответствия между конвергенцией и аккомодацией глаз, или построение мультифокального стереодисплея [40, 57, 58].

Для согласования дистальных стимулов глубины – конвергенции и аккомодации глаз – разработан в КТИ НП СО РАН совместно с ООО «Софтлаб-НСК» стереоскопический дисплей с бифокальными очками [36]. Каждый окуляр содержит две микродисплейные матрицы на органических светодиодах, изображения которых комбинируются с помощью светоделительного кубика. Таким образом, объемное изображение представлено четырьмя SVGA-изображениями [46]. В работах [58, 59] показано, что при дифракционном анализе линейной комбинации двух планов изображений глаз аккомодирует на пиковое значение аксиальной интенсивности при любых аберрациях оптической системы «окуляр + глаз». Однако при этом возникают большие потери контраста: от 10 % до 45 % [60]. Более того, при различных размерах зрачка глаза интенсивность полусумм тоже меняется, так как глаз является одним из компонентов дисплея (комбинирование интенсивностей планов-изображений происходит на сетчатке). В исследовании [53] приведен способ повышения контраста комбинированных изображений в трехмерных дисплеях при диаметре зрачка 3 мм на модели глаза Атчисона. На рис. 48. приведена схема, состоящая из модели двух-планового окуляра 1 и модели глаза 2 с входным зрачком a , позволяющая обеспечить соответствие между аккомодацией и конвергенцией глаз.

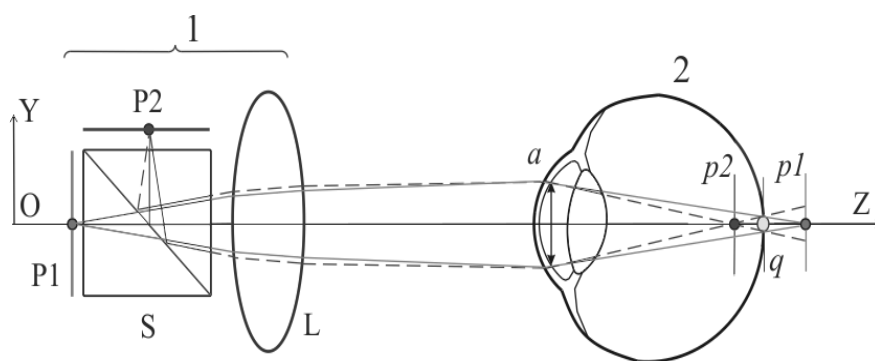


Рисунок 48 – Формирование объемного изображения, стимулирующего аккомодацию, на сетчатке глаза. 1 – биплановый окуляр, 2 – модель глаза, а – входной зрачок.

Окуляр содержит два плоских изображения P1 и P2, и с помощью линзы L формирует их мнимое изображение. Благодаря светоделительному кубу S мнимые изображения P1 и P2 оказываются *соосными* и перпендикулярными зрительной оси OZ. Излучения элементов изображений P1, P2 фокусируются хрусталиком глаза в световые пятна изображений p1 и p2 таким образом, чтобы максимум суммарной энергии находился в районе центральной ямки глаза (*фовеа*) q. Дисплей относится к дисплеям иммерсивного (создающий эффект погружения, наблюдатель видит только виртуальное формируемое изображение) типа. Изображения с двух микродисплеев, пройдя через светоделительный куб и окуляр, попадают на сетчатку человеческого глаза. Объемность изображения достигается за счет стереоизображения и разноудаленных от светоделительного кубика микродисплеев.

Все последующие расчеты стереоокуляра [61] 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. Спектральный диапазон окуляра 486–656 нм. Полученная модель показана на рисунке 49. 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.

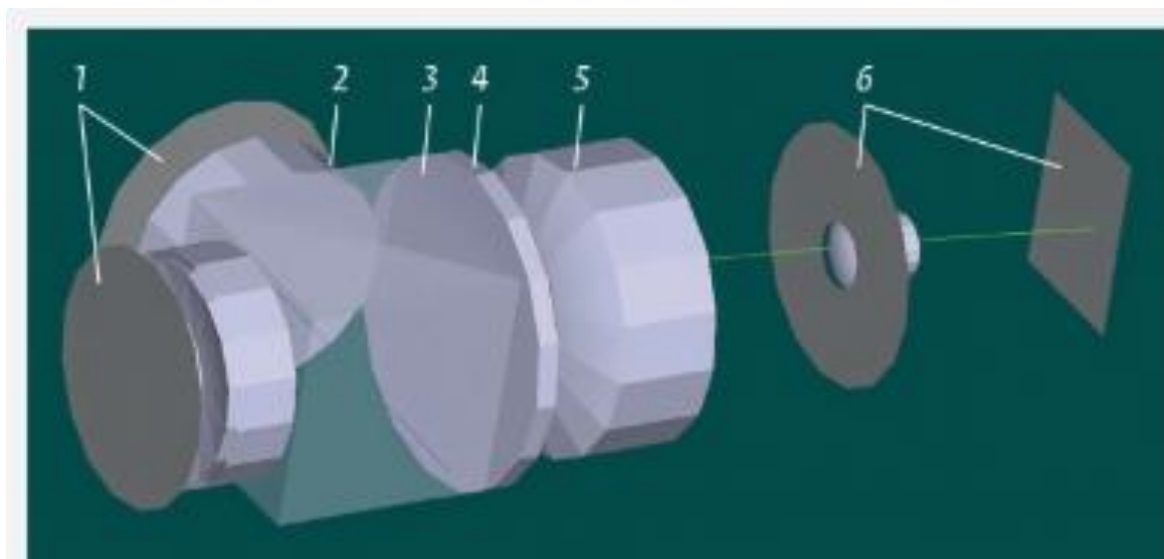


Рисунок 49 – Модель оптической системы стереоокуляра: 1 – микродисплей, 2, 4, 5 – склеенные линзы, 3 – светоделительный куб, 6 – сетчатка.

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 рисунке 50 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 пикселя 9.3 мкм. Дисторсии не превышают 5%, кривизна поля не более 0,05 мм.

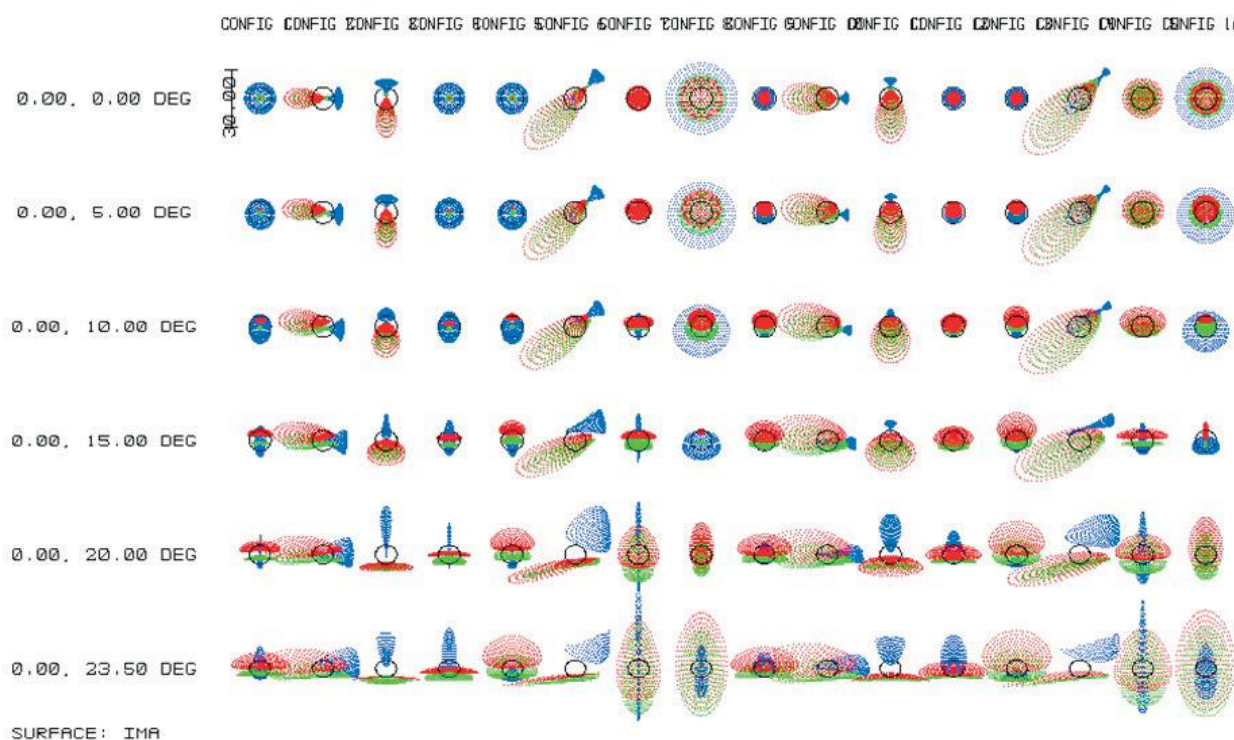


Рисунок 50 – Пятна рассеяния стереоокуляра (для 16 различных конфигураций устройства)

В ходе работы система была исследована на появление призраков в последовательном режиме. На рисунке 51 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 абберация выражены слабо.



Рисунок 51 – Изображение, формируемое оптической системой на сетчатке человека

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 к особенностям глаз наблюдателя. По разработанной конструкторской документации были изготовлены узлы и детали, проведена сборка макета стереоокуляров рисунок 52.



Рисунок 52 – Макет стереоокуляров

Для формирования изображения на микродисплейных матрицах 3D дисплея использовалось самостоятельно разработанное специализированное программное обеспечение (ПО), формирующее одновременно четыре изображения, по одному для каждой из фокальных плоскостей каждого из окуляров (приложение А Акт внедрения).

Коэффициенты линейной комбинации планов вычисляются для каждого из пикселей по формуле, приведенной в [40, 59, 62, 63], изображения для фокальных плоскостей формируются исходя из карты этих коэффициентов. Для вычисления коэффициентов требуется рассчитать расстояние до поверхности объекта, для каждого пикселя. Это расстояние вычисляется из значения, доступного в Z-буфере (буфере глубины), обычно используемом для определения видимости.

ПО работает в реальном времени и позволяет, при помощи клавиатуры и мыши, переключаться между коридорами, менять размеры переменного стимула, перемещать эталонный стимул.

В данной главе проводится анализ влияния разработанного 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.

5.3 Методика и результаты экспериментальных исследований.

На выше описанном дисплее проводилась серия экспериментов Холуэя и Боринга доказавшие, что в восприятии признаков расстояния решающая роль принадлежит константности восприятия размера. Эксперимент А. Холуэя и Э. Боринга показал зависимость между величиной переменного стимула и удаленностью эталонного стимула [56]. 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 4 варианта 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) монокулярное наблюдение через «искусственный зрачок» – т.е. маленькую дырочку (поскольку нет движения глаз и головы, такое наблюдение исключает монокулярный параллакс и линейную перспективу);

4) затемненное помещение.

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.

Основной целью наших экспериментов являлась проверка соответствия формируемого пространства в дисплее естественному восприятию и соответствуют ли полученные данные эксперимента тем, что были получены в ходе исследований [56]. В первом случае источник света (мишень) помещался в ограниченное пространство и удалялся от наблюдателя на некоторое расстояние, причем размер мишени в каждом случае менялся. Наблюдатель же, в свою очередь, должен был примерно оценить размер этой мишени. Измерения проводились в хорошо освещенном пространстве и в темноте. Во втором случае проводились аналогичные опыты, но без изменения размера источника.

На рис. 53 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.



а)



б)

Рисунок 53 – 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.

По результатам экспериментов с пятью испытуемыми, были построены следующие графики зависимостей воспринимаемого размера мишени от расстояния до мишени (рис. 54-58). Измерения каждым испытуемым проводились по 5 раз, результаты усреднялись и на графиках отмечался так же разброс полученных значений.

На рис. 55 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 выставил 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.

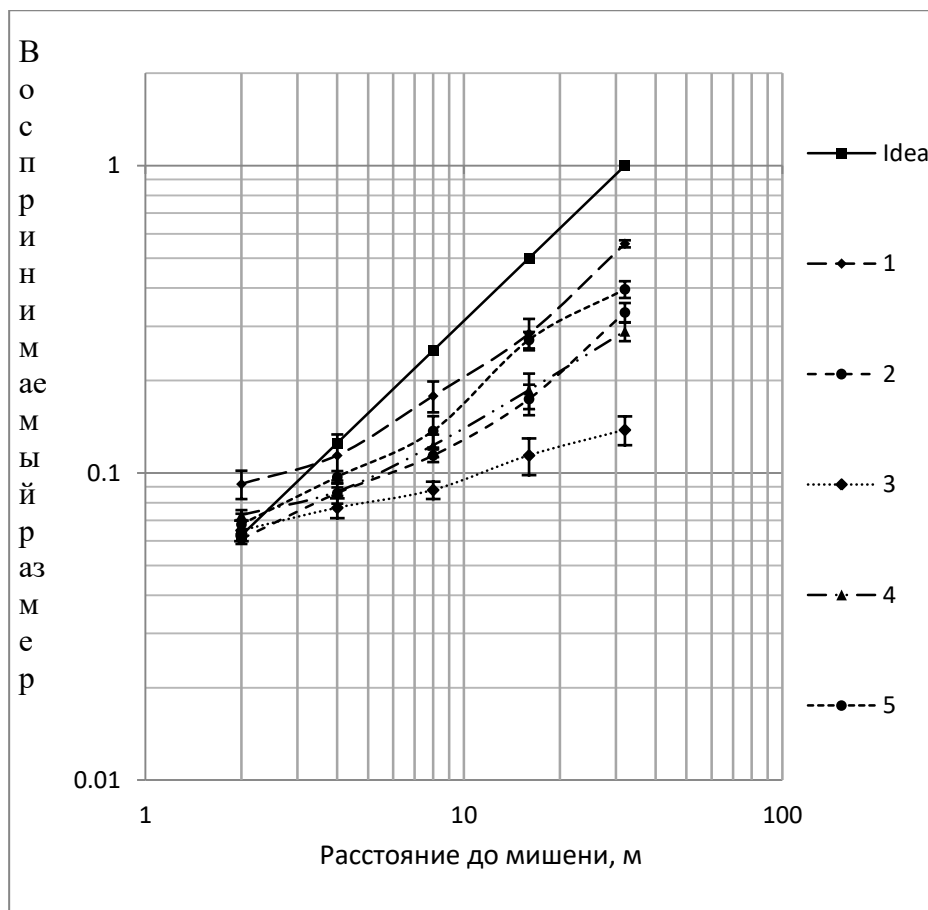


Рисунок 55 – График зависимости воспринимаемого наблюдателем размера мишени от расстояния до нее в условиях хорошей освещенности пространства и при постоянном углового размера мишени.

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).

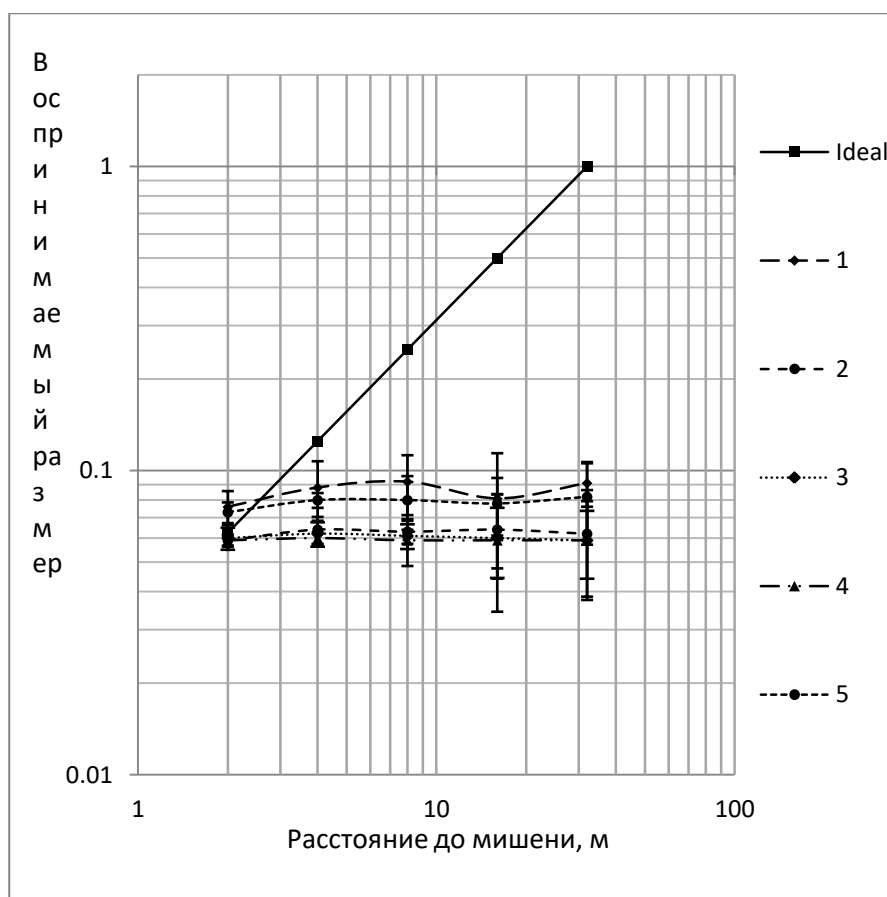


Рисунок 56 – График зависимости воспринимаемого наблюдателем размера мишени от расстояния до нее в условиях полной темноты и при постоянном угловом размере мишени.

На рис. 56 представлен график, в отличие от первого случая, полученный по результатам, снятым в условиях темноты, но также с постоянным угловым размером мишени. Линией «Ideal» показано фактическое изменение размера мишени в зависимости от расстояния на которое она отнесена от наблюдателя. 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.

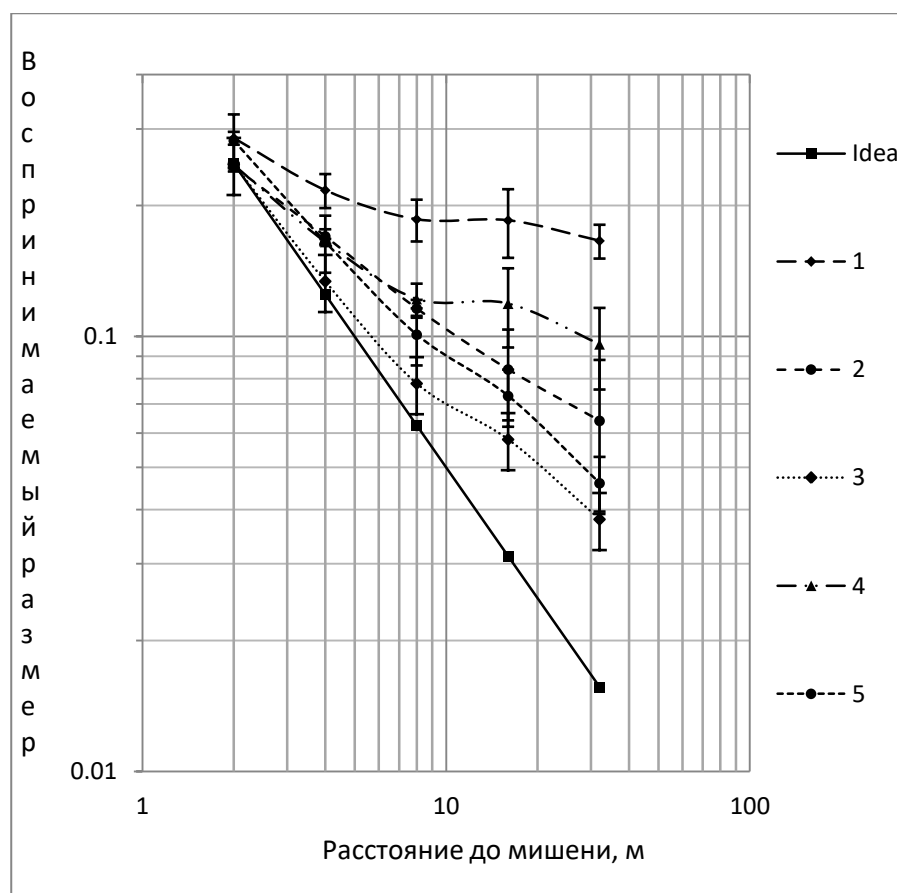


Рисунок 57 – График зависимости воспринимаемого наблюдателем размера мишени от расстояния до нее в условиях хорошей освещенности пространства и при постоянном размере мишени (при этом угловой размер мишени уменьшается с увеличением расстояния до нее).

Показанный на рис. 57 график основан на полученных результатах, снятых в освещенном пространстве (коридоре), с постоянным линейным размером мишени, но при этом с увеличением расстояния до мишени естественно, что угловой размер ее уменьшался, как и уменьшалось проецируемое ее изображение на сетчатке глаза. Расстояния удаления от испытуемого сохранились такими же, как и в первых двух случаях (2, 4, 8, 16, 32). По кривым 1-5 видно, как наблюдатели стабильно фиксировали уменьшение размеров мишени пропорционально увеличению расстояния, однако, один наблюдатель отмечал лишь слабое уменьшение размера при этом у остальных наблюдателей размер практически совпадал с угловым размером мишени.

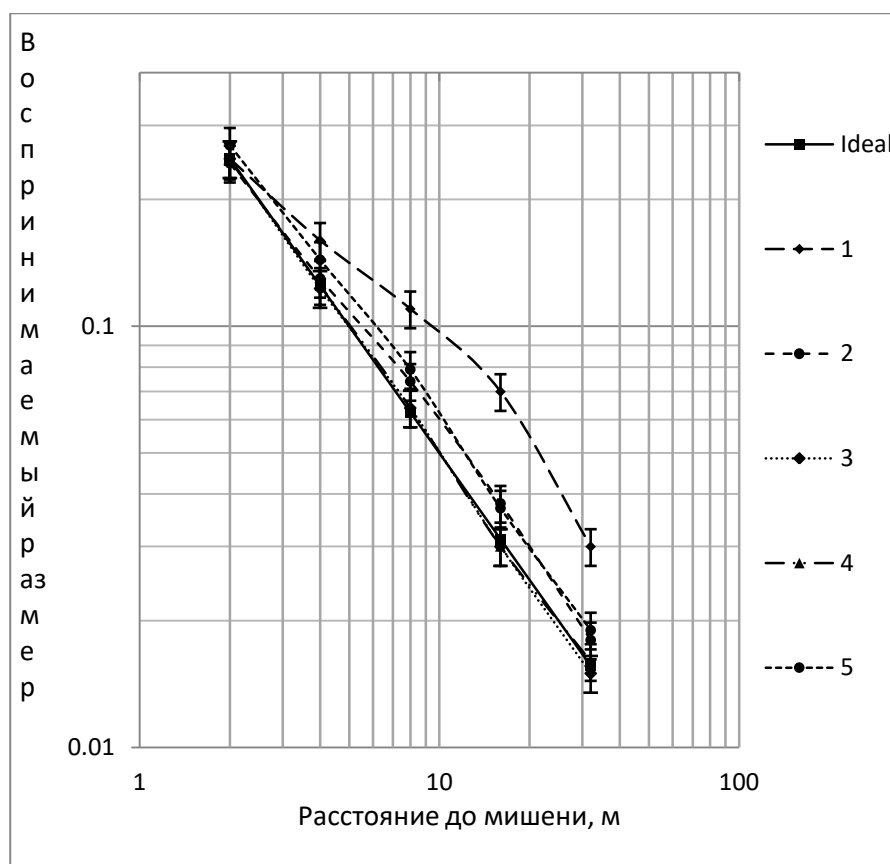


Рисунок 58 – График зависимости воспринимаемого наблюдателем размера мишени от расстояния до мишени в условиях темноты и при постоянном размере мишени (при этом угловой размер мишени уменьшается с увеличением расстояния до нее).

На рис. 58 представлен график, в отличие от предыдущего случая, полученный по результатам, снятым в условиях темноты, но также с постоянным размером мишени и уменьшающимся угловым размером. Линией «Ideal» в данном случае показано фактическое изменение углового размера мишени, в зависимости от расстояния на которое она отнесена от наблюдателя. По кривым 1-5 видно как наблюдатели фиксировали уменьшение объекта в размерах и в этом случае данные практически совпадали с угловым размером мишени, в отличие от случая с освещенным коридором, когда наблюдателям казалось, что мишень лишь слегка уменьшается в размерах.

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.

Выводы главы 5

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 распространить 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения визуального комфорта в любой из виртуальных сред предложены способы построения многоплановых, мультифокальных окуляров, стимулирующих аккомодацию глаз.

Использование дисплейных устройств с согласованными стимулами аккомодации и конвергенции обеспечивает естественное, комфортное и достоверное зрительное восприятие при решении задач ориентации, обзора, управления движением, что дает следующие преимущества перед традиционными дисплейными стереосистемами:

- а) Достоверное определение размеров изображаемых объектов и расстояний до них;
- б) Более точное манипулирование удаленными механизмами и манипуляторами;
- в) Отсутствие привития ложных навыков, что критически важно для тренажерных комплексов;
- г) Уменьшение негативного воздействия на зрительную систему человека в силу согласованности стимулов
- д) Более продолжительное время непрерывной работы операторов.

Так же следует отметить, что помимо визуального комфорта, многоплановый 3D дисплей обеспечивает прямые и косвенные признаки глубины, позволяющие естественным образом оценивать расстояния и размеры предметов.

Прямые признаки глубины стимулируют близкую к корректной аккомодацию глаз, их конвергенцию и стереоскопическую диспаратность.

Косвенные признаки поддерживаются программным обеспечением и включают окклюзии и автоокклюзии, многовариантную перспективу, изменение контраста и градиента текстуры, двигательный параллакс и др.

Основные результаты работы:

Проведение патентно-информационных исследований по проблеме. Построена концептуальная модель систем коллективного пользования и взаимодействия в трехмерной виртуальной среде с добавленной физической реальностью. Рассмотрены оптоэлектронные сенсоры поверхностей трёхмерных предметов. Проведена базовая классификация методов и средств восприятия и их сравнительный анализ.

Исследованы пути создания визуально комфортных стереоскопических наголовных дисплеев, стимулирующих аккомодацию глаз. Решена задача определения инструментов, которые бы позволяли создавать n-ное количество планов изображений, а так же задача комбинирования планов изображений.

Выполнены расчеты схем поляризационных проекционных наголовных дисплеев. А так же решена задача светопотерь такого типа дисплеев. Для решения этой задачи предложен способ подсветки микродисплеев типа DMD (digital micromirror device) при использовании их в наголовных дисплеях.

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. На основе данных коэффициентах было разработано специализированное программное обеспечение, формирующее одновременно четыре плоских изображения, по одному для каждой из фокальных плоскостей очков.

Предложена схема трехмерного мультифокального дисплея с увеличением углового поля зрения (FOV).

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 диссертационная работа рассматривает оптико-информационную систему коллаборации на основе ретрорефлективной стереоскопической виртуальной среды с добавленной физической реальностью (физическими лицами). В рамках работы 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 так же 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 (рис. 59). 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.



Рисунок 59 – Оператор с мультифокальным дисплеем

Список литературы

1. Александров Ю. И. Основы психофизиологии. М.: ИНФРА-М, 1997. - 349 с.
2. Ананьев Б. Г., Рыбалко Е. Ф. Особенности восприятия пространства у детей
3. Власов В. Г. Гештальт. Новый энциклопедический словарь изобразительного искусства. В 10 т. - СПб.: Азбука-Классика. Т. III. 2005. С. 151.
4. Власов В. Г. Психология искусства. Новый энциклопедический словарь изобразительного искусства. В 10 т. - СПб.: Азбука-Классика. Т. VII. 2007. С. 860-865.
5. Маклаков А. Г. Общая психология. СПб: Питер, 2001.
6. Рубинштейн С. Л. Основы общей психологии. СПб., 1998.
7. Грачева М.А. Современные шлемы виртуальной реальности: причины появления дискомфорта и способы их исправления / М.А. Грачева, А.С. Большаков // Киномеханик сегодня. – 2016. – № 6. – С. 30–35.
8. Хиллис Е.М. Влияние использования шлема виртуальной реальности на зрительные функции / Е.М. Хиллис, Т.П. Кащенко, Т.А. Корнюшина // Медицина труда и промышленная экология. – 2006. – № 9. – С. 16-23.
9. A.M. Kovalev, E.V. Vlasov. Quality of a Three-Dimensional Image Stimulating Eye Accommodation Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2012, Vol. 48, No. 4, pp. 351–357.
10. Петровский Б.В. Краткая медицинская энциклопедия М. Издательство Советская Энциклопедия издание второе, 1989.
11. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. т.4 М.:1989
12. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. т.3
13. Alexander Schratt, A. Riedl. The Potential of Three-dimensional Display-Technologies for the Visualization of Geo-virtual Environments. XXII International Cartographic Conference (ICC2005) – A Coruña 2005, Mapping Approaches into a Changing World.
14. Андреев А. Л., Компанец И. Н., Пожидаев Е. П. Объемный экран трехмерного дисплея для томографии // Альманах клинической медицины. 2008. №17-1.
15. J. Rolland, M. Krueger, and A. Goon, "Multifocal planes head-mounted displays," Applied Optics. Vol. 39, Issue 19, 3209-3215 (2000).

16. Ковалев А.М. Патент на изобретение. Мультифокальный стереодисплей. Номер патента: RU 2201610 С2. Патентное ведомство: Россия. Год публикации: 2003.

17. Akeley K., Watt S.J., Girshick A.R., Banks M.S. A stereo display prototype with multiple focal distances // ACM Trans. Graph. 2004. 23, No.3. 804-813.

18. Love G.D., Hoffman D.M., Hands P.J., Gao J., Kirby A.K., Banks M.S. High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display// Optics Express. 2009. 17, No.18. 15716-15725.

19. Javidi, Bahram & Hua, Hong & Stern, Adrian & Martinez-Corral, Manuel & Matobe, Osamu & Wetzstein, Gordon. (2022). Focus issue introduction: 3D image acquisition and display: technology, perception and applications. Optics Express. 30. 4655-4658. 10.1364/OE.454487.

20. Hua, Hong & Huang, Hekun & Wang, Xuan. (2023). 44-1: Invited Paper: Review on Time-Multiplexed Methods for High-Performance Head-Mounted Light Field Displays. SID Symposium Digest of Technical Papers. 54. 627-630.

21. Javidi, Bahram & Hua, Hong & Stern, Adrian & Martinez-Corral, Manuel & Matoba, Osamu & Doblas, Ana & Thibault, Simon. (2023). Focus Issue Introduction: 3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications. Optics Express. 31.

22. Hua, Hong & Stern, Adrian & Javidi, Bahram & Martinez-Corral, Manuel & Matobe, Osamu & Doblas, Ana & Thibault, Simon. (2024). Focus issue introduction: 3D image acquisition and display: technology, perception and applications. Optics Express. 32.

23. H. Hua, L.D. Brown, C. Gao. SCAPE: Supporting Stereoscopic Collaboration

in Augmented and Projective Environments// IEEE Computer Graphics and Applications, January/February 2004, P. 66-75.

24. Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin and Thomas A. DeFanti. Surround-Screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE// SIGGRAPH'93: Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, DOI:10.1145/166117.1661346, pp. 135–142.

25. H. Hua, A. Girardot, C. Gao, J.P. Rolland. Engineering of head-mounted projective displays// APPLIED OPTICS. Vol. 39, No. 22, 1 August 2000, P. 3814-3824.

26. Электронный ресурс:
www.canon.com/technology/approach/special/mr.html

27. Ковалев А.М. О моделях визуального пространства // Оптика и спектроскопия. 2006. 100, № 1. С.134-141.
28. Ковалев А.М., Лищенко В.Е., Степанов М.В. О системах перспектив для компьютерной графики // Автометрия. 2007. 43, №3. С. 48-56.
29. Ковалев А.М., Власов Е.В. О качестве трехмерного изображения, стимулирующего аккомодацию глаза// Автометрия. 2012. 48, №4. С. 33-40.
30. Электронный ресурс:
<http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/124.pdf>
31. Электронный ресурс: <http://www.primesense.com/>
32. Электронный ресурс: <http://occipital.com/>
33. Электронный ресурс:
http://ru.wikipedia.org/wiki/Стереодисплей#cite_note-23
34. Электронный ресурс: http://pages.samsung.com/ca/3dtv/3D-tv-warning_en.pdf
35. В.Г. Комар, С.Н. Рожков, Д.А. Чекалин // Необходимость нормирования параметров стереопары и стереопроекции с целью снижения зрительного дискомфорта в условиях кинозала
36. 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.
37. Ковалев А.М. Власов Е.В. О качестве трехмерного изображения, стимулирующего аккомодацию глаза // Автометрия. – 2012. – Т.48. – № 4. – С. 33-40.
38. Akeley K., Watt S.J., Girshick A.R., Bancks M.S. A stereo display prototype with multiple focal distances // ACM Trans. Graph. 2004. 23, No.3. 804-813.
39. Love G.D., Hoffman D.M., Hands P.J., Gao J., Kirby A.K., Bancks M.S. High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display// Optics Express. 2009. 17, No.18. 15716-15725.
40. Ковалев А.М. О мультифокальных дисплеях, дифракционной глубине фокуса и визуальном комфорте // Автометрия. 2010. 46, № 3. С. 86–94.
41. Mackenzie K.J., Hoffman D.M., Watt S.J. Accommodation to multiple-focal-plane displays: Implications for improving stereoscopic displays and for accommodation control // Journal of Vision. 2010. 10(8), №22. 1-20.

42. Bakaraju R.C., Ehrmann K., Papas E., Ho A. Finite schematic eye models and their accuracy to in-vivo data // Vision Research. 2008. 48. 1681-1694.
43. Applegate R.A., Lakshminarayanan V. Parametric representation of Stiles-Crawford functions: normal variation of peak location and directionality // JOSA. 1993. 10. No.7. 1611-1623
44. Шиффман Х.Р. Ощущение и восприятие. 5-е изд. – СПб.: Питер, 2003.
45. Сергиенко Н.М. Офтальмологическая оптика // Медицина. М. 1991.
46. Власов Е.В., Ковалев А.М. 3D Дисплей с согласованными стимулами аккомодации и конвергенции // Журнал «Приборы». 2014. №12(174). – С. 28-30.
47. Патент - Head-mounted projection display using reflective microdisplays/Pub.No: US 2013/0329304 A1 Pub. Date: Dec. 12, 2013 Applicants: The Arizona Board of Regents on Behalf of the University of Arizona, Tucson, AZ (US).
48. Патент - Coupling prism assembly and projection system using the same./Pub.No: US5309188, Pub. Date: May 3, 1994
49. Xinda Hu, Hong Hua. An Optical See-through Multi-Focal-Plane Stereoscopic Display Prototype Enabling Nearly-Correct Focus Cues // Proc. SPIE 8648, Stereoscopic Displays and Applications XXIV, 86481A (12 March 2013); doi: 10.1117/12.2005117
50. David M. Hoffman, Philip J.W. Hands, Andrew K. Kirby, Gordon D. Love, and Martin S. Banks. Stereo display with time-multiplexed focal adjustment // Proc SPIE. 2009 ; 7237: 72370R. doi:10.1117/12.807170.
51. 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.
52. 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. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-972-975
53. Власов Е.В, Патерикин В.И. Просветные 3D мультифокальные дисплеи на основе объемной виртуальной среды с добавленной физической реальностью // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 5. № 1. С. 116 119.
54. Е.В. Власов «О повышении контраста комбинированных изображений в трехмерных мультифокальных дисплеях» // Журнал «Приборы» - 2017 - №9– С. 34-38.

55. Власов Е.В. Способы повышения контраста комбинированных изображений и линейности стимула аккомодации глаза в мультифокальных трехмерных дисплеях // Автометрия. – 2018. – №1. – С. 78-84.

56. Шиффман Х. Ощущение и восприятие (Sensation and Perception. An Integrated Approach). – СПб, 2003. – 928 с. – ISBN 5-318-00373-7

57. Высоков И. Е. Психология познания : учебник для бакалавриата и магистратуры / И. Е. Высоков. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 399 с. – (Бакалавр и магистр. Академический курс). – ISBN 978-5-9916-3528-8. – Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. – URL: <https://biblio-online.ru/bcode/426256> (дата обращения: 01.07.2019).

58. Alfred H. Holway and Edwin G. Boring. Determinants of Apparent Visual Size with Distance Variant – The American Journal of Psychology, Vol. 54, No. 1 (Jan., 1941), pp. 21-37

59. Shibata, T., Kim, J., Hoffman, D. M., and Banks, M. S. (2011). The zone of comfort: predicting visual discomfort with stereo displays, Journal of Vision, 11(8):8

60. Kim, J., Kane, D., and Banks, M. S. (2014). The rate of change of vergence-accommodation conflict affects visual discomfort, Vision Research, 105, 159-165.

61. 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. doi: 10.22184/1993-7296.FROS.2024.18.7.564.568

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

63. 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.

Приложение А

Акт внедрения

Общество с ограниченной ответственностью «СофтЛаб-НСК»

Акт внедрения

г. Новосибирск

10 октября 2024г.

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Власова Е.В. на тему: «Методы повышения качества формируемого пространства в наголовных мультифокальных системах объемного отображения визуальной информации» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы при разработке выставочного образца многопланового 3D дисплея.

Для формирования изображения на микродисплейных матрицах 3D дисплея использовалось самостоятельно разработанное специализированное программное обеспечение (ПО), формирующее одновременно четыре изображения, по одному для каждой из фокальных плоскостей каждого из окуляров. Рассчитанные коэффициенты, необходимые для корректировки функции комбинации планов изображений, с целью повышения контраста объемного изображения и повышения линейности стимула аккомодации для зрачков глаз диаметром 2,7-3,3мм успешно применены в ПО при формировании трехмерного изображения.

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.

По результатам работ был 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.

А также опубликованы 2 статьи:

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.

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.

Генеральный директор _____ / Травина И.А./

Руководитель отдела ВР _____ / Бартош В.С./

