На правах рукописи

Гребенюк Константин Александрович

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СО СХОДЯЩИМИСЯ ОПТИЧЕСКИМИ ОСЯМИ

Специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Саратов, 2008

Работа выполнена на кафедре прикладной оптики и спектроскопии Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Владимир Владимирович Петров**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Вил Бариевич Байбурин**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник **Василий Александрович Ежов**

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук

Защита состоится 10 октября 2008 года в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 в Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, СГУ, Физический факультет, корпус 3.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского.

Автореферат разослан 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета В.М. Аникин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Человек видит мир объемным благодаря бинокулярному зрению. На сетчатках левого и правого глаз формируются перспективные изображения левого и правого ракурсов объекта, которые воспринимаются как единый объемный образ. Подобные перспективные изображения могут быть получены и в стереоскопическом приборе посредством двух одинаковых оптических систем. При этом ход лучей в стереоскопической системе может быть непрерывным, как в стереомикроскопах, или прерываться фотографической фиксацией промежуточного изображения, как в стереоскопических видеосистемах.

Интенсивное развитие стереоскопических систем сделало актуальным вопрос о геометрическом соответствии наблюдаемого в них пространства изображений пространству реальных предметов. Погрешности, нарушающие это соответствие, получили название пространственных искажений и были исследованы такими учеными как П.П. Атанасов, А.Г. Болтянский, Н.А. Валюс и Л.Я. Окунев, Д.Ю. Гальперн и Л.Н. Голованова, Б.Т. Иванов, Ю.И. Короев, Г.В. Мамчев, М.М. Русинов, А.И. Тудоровский, В.Н. Чуриловский, А.Н. Шацкая, D.B. Diner, V.S. Grinberg, L.F. Hodges и D.F. McAllister, A. Kavanagh, H.F. Kurtz, B. Lacotte, L. Lipton, B.G. Saunders, A. Woods, H. Yamanoue, Ch. Yang, H. Yoshino и другими, однако проблема пространственных искажений еще не может считаться решенной и требует дальнейшего изучения. В частности, до данного исследования в литературе отсутствовала ясность относительно возможности оптической коррекции пространственных искажений, возникающих в стереоскопических видеосистемах со сходящимися оптическими осями объективов камер.

В стереоскопических видеосистемах (СВС) объемность наблюдаемого изображения достигается благодаря раздельному бинокулярному наблюдению двух плоских изображений (стереопары), соответствующих левому и правому ракурсам наблюдения трехмерной сцены. Стереопару получают с помощью двух съемочных камер, оптические оси объективов которых либо параллельны, либо сходятся в центре исследуемой сцены. Использование схемы со сходящимися осями приводит в известных СВС к возникновению дополнительных пространственных искажений, а именно, к искривлению стереоскопического изображения и к появлению вертикального параллакса.

Для устранения указанных искажений в литературе рекомендуется ограничивать использование съемки со сходящимися осями или осуществлять программную коррекцию получаемых изображений. При этом упускается из виду возможность оптической коррекции наблюдаемого изображения за счет изменения схемы воспроизведения стереопары. Данное упущение связано с тем, что в известных работах исследование пространственных искажений ограничивается случаем наблюдения левой и правой частей стереопары в общей плоскости. Это ограничение приводит к выводу о невозможности

получения неискривленного стереоизображения от камер со сходящимися осями.

Исследование пространственных искажений в СВС осложняется и тем, что в современной литературе отсутствует общепринятая терминология и классификация путей реализации таких систем. Ряд ценных обзоров и словарей по стереоскопии был подготовлен Н.А. Валюсом, Н.А. Овсянниковой и С.Н. Рожковым, В.А. Ежовым и С.А. Студенцовым, коллективом авторов в составе В.Б. Байбурина, Ю.А. Зайцева, А.В. Никонова, В.М. Долгова и Ю.М. Долгова, L. Lipton, N. Holliman, D. McAllister, M. Starks, A. Woods и другими, однако, данные работы не всегда позволяют разобраться в неоднозначных трактовках и классификациях, встречающихся в литературе. Актуальность этой проблемы подтверждается также материалами Международных форумов по стандартам стереоскопических изображений.

Пространственные искажения, описанные выше, могут возникать не только в стереоскопических видеосистемах, но и в стереоскопических микроскопах. Если в микроскопе плоского поля для получения качественного изображения достаточно устранения оптических аберраций, то в стереоскопических приборах присутствуют дополнительные факторы, влияющие на качество итогового объемного изображения. Эти факторы, связанные с особенностями стереоскопического восприятия, по сравнению с оптическими аберрациями гораздо менее изучены. Так, первый стереомикроскоп по схеме Аббе был изготовлен в 1950-х годах, однако только в 1969 году Л.А. Фединым и Л.Н. Цветковой были разработаны рекомендации по рациональному выбору угла между окулярами этого стереомикроскопа. Проблема пространственных искажений в стереомикроскопах Аббе и, в частности, роль угла конвергенции окуляров в появлении пространственных искажений, были исследованы A.J. Kavanagh в 1969 году.

В стереомикроскопах Грену проблема пространственных искажений с самого начала принималась во внимание. Изобретатель стереомикроскопа H. Greenough проектировал свой прибор именно как «ортоморфоскоп», то есть дающий объемное изображение, геометрически подобное пространству предметов. Угол конвергенции окуляров в стереомикроскопах Грену был равен углу конвергенции объективов и составлял 12-14°, что при среднем глазном базисе 6,5 см позволяло наблюдать стереоизображение примерно на расстоянии наилучшего видения 25 см.

В современных стереомикроскопах по схеме Грену угол конвергенции окуляров часто не равен углу конвергенции объективов, однако в литературе отсутствуют рекомендации по выбору угла конвергенции оптических осей окуляров с точки зрения минимизации пространственных искажений. П.П. Атанасовым, P. Nothnagle, W. Chambers и M. Davidson было описано возникновение искривления стереоизображения и вертикального параллакса в современных стереомикроскопах Грену, однако не были найдены условия устранения данных искажений.

Целью данной диссертационной работы явилось исследование новых возможностей устранения пространственных искажений в стереоскопических системах со сходящимися оптическими осями.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Создание полной и непротиворечивой классификации основных подходов к воспроизведению стереоскопических изображений.
2. Теоретическое исследование новых возможностей устранения пространственных искажений в стереоскопических видеосистемах со сходящимися оптическими осями объективов камер.
3. Нахождение условий устранения пространственных искажений в стереомикроскопах со сходящимися оптическими осями (стереомикроскопах по схеме Грену).
4. Создание экспериментальной базы для исследования пространственных искажений в стереоскопических видеосистемах.
5. Экспериментальная проверка возможности оптической коррекции вертикального параллакса путем представления левого и правого перспективных изображений в пересекающихся плоскостях наблюдения.
6. Экспериментальное исследование зависимости угла пересечения плоскостей наблюдения левого и правого изображений, требуемого для оптической коррекции вертикального параллакса, от угла конвергенции камер.

Научная новизна работы

Впервые проблема пространственных искажений в стереоскопических видеосистемах исследована для случая, когда части стереопары воспроизводятся в пересекающихся плоскостях наблюдения, а не в общей плоскости.

Предсказаны эффекты устранения вертикального параллакса и искривления стереоскопического изображения при воспроизведении стереопары от камер со сходящимися осями в пересекающихся плоскостях наблюдения.

Предложен и обоснован новый принцип построения стереоскопических видеосистем, обеспечивающий оптическую коррекцию вертикального параллакса и искривления стереоизображения при воспроизведении стереопар от камер со сходящимися осями. В отличие от известных систем, где левое и правое изображения стереопары воспроизводятся в общей плоскости, в предложенной конфигурации левое и правое изображения воспроизводятся в разных плоскостях, пересекающихся под расчетным углом, что приводит к оптической компенсации указанных искажений.

С помощью созданной экспериментальной установки впервые получен и исследован эффект устранения вертикального параллакса при воспроизведении левого и правого перспективных изображений в пересекающихся плоскостях наблюдения. Впервые стереопара с вертикальным параллаксом, вызывающим сильное двоение при воспроизведении в общей плоскости, наблюдалась как

единое объемное изображение благодаря воспроизведению в пересекающихся плоскостях согласно предложенному принципу.

В рамках коллинеарной оптики получено условие устранения вертикального параллакса и искривления стереоскопического изображения для стереоскопических микроскопов Грену. Показано, что оба искажения устраняются при одном и том же условии, причем для всех точек наблюдаемого стереоскопического изображения.

Составлена классификация современных подходов к воспроизведению стереоскопических видеоизображений, основанная на четком различении понятий метода, формата и технологии применительно к стереоскопическим системам. В качестве признака классификации методов сепарации световых потоков от левого и правого перспективных изображений использованы физические характеристики световой волны.

Предложен, реализован и запатентован новый способ воспроизведения стереоскопических изображений, использующий эффект Брюстера для поляризации светового потока от одного из перспективных изображений.

Научно-практическая ценность работы

Полученные теоретические и экспериментальные результаты по устранению искривления стереоизображения и вертикального параллакса в стереоскопических видеосистемах и стереоскопических микроскопах расширяют научные представления о пространственных искажениях в стереоскопических системах со сходящимися оптическими осями и открывают новые возможности для оптической коррекции указанных искажений.

Положение об устранении искажений в стереоскопических видеосистемах дает новый принцип построения стереоскопических систем, который может быть использован в системах медицинской визуализации, системах дистанционного управления, системах производственного контроля и в других областях, требующих высокой точности отображения пространственных соотношений между объектами. Предложенный принцип воспроизведения стереопары в пересекающихся плоскостях совместим по крайней мере с двумя уже существующими стереоскопическими технологиями: нашлемными стереодисплеями и стереодисплеями с двумя экранами и светоделительной пластиной.

Полученные в данной работе новые формулы, связывающие параметры стереоскопической видеосистемы, координаты левого и правого перспективных изображений и угол пересечения плоскостей наблюдения перспективных изображений, могут использоваться для косвенного измерения одной из входящих в них величин, например, фокусного расстояния камер или угла конвергенции.

Найденное условие устранения искажений в стереомикроскопах может быть использовано для рационального выбора угла между осями окуляров в стереомикроскопах Грену.

Созданная классификация современных подходов к воспроизведению стереоскопических видеоизображений будет полезна для выбора оптимальных

метода, формата и технологии при организации экспериментов по стереоскопии или при разработке новых стереоскопических систем. Данная классификация имеет также научно-методическое значение и в настоящее время используется в учебном курсе «Приборы и методы прикладной оптики и спектроскопии», читаемом д.ф.-м.н., профессором В.В. Петровым в Саратовском государственном университете.

Предложенный способ воспроизведения стереоизображений с использованием эффекта Брюстера дает возможность наблюдать стереоскопическое изображение, используя в качестве светоделителя прозрачную стеклянную пластину, что позволяет легко реализовать его в любой научной лаборатории или учебном практикуме. Данный способ успешно реализован в лабораторной работе «Стереоскопическое зрение и воспроизведение стереоскопических изображений» практикума кафедры прикладной оптики и спектроскопии Саратовского государственного университета.

Достоверность научных результатов и выводов, полученных в диссертации, подтверждается совпадением результатов, полученных при решении одних и тех же задач различными методами; правильностью следствий, к которым приводят полученные теоретические положения в ряде предельных случаев; совпадением результатов расчета и эксперимента; воспроизводимостью экспериментальных результатов.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. При воспроизведении стереопары от камер со сходящимися оптическими осями возможна оптическая коррекция вертикального параллакса и искривления стереоскопического изображения путем представления левого и правого перспективных изображений в пересекающихся плоскостях наблюдения. Угол α пересечения плоскостей наблюдения, при котором осуществляется коррекция указанных искажений, определяется формулой

$$\sin\alpha = \frac{V}{M\, f_C}\, tg\beta\,,$$

где V – дистанция наблюдения, f_C – фокусное расстояние камер, M – увеличение кадра; β - угол конвергенции оптических осей объективов камер.

2. Для стереоскопического микроскопа Грену с центрированными развертками левой и правой оптических систем существует условие устранения вертикального параллакса и искривления стереоскопического изображения, определяемое соотношением

$$tg\varphi = \frac{1}{W_P}\, tg\psi\ ,$$

где φ и ψ - углы конвергенции оптических осей окуляров и объективов стереомикроскопа соответственно, W_P – угловое увеличение в зрачках левой и правой оптических систем стереомикроскопа.

3. Экспериментальные зависимости степени двоения изображения при наблюдении стереопары от камер со сходящимися осями от угла α пересечения плоскостей наблюдения левого и правого перспективных изображений, доказывающие возможность устранения двоения путем наблюдения перспективных изображений в пересекающихся плоскостях. Экспериментальные зависимости угла α пересечения плоскостей наблюдения, при котором устраняется двоение, от угла β конвергенции камер, показывающие, что для данного β устранение двоения происходит не при единственном значении α, а в некотором диапазоне значений.

4. Классификация методов воспроизведения стереоскопических изображений по физическим характеристикам световой волны, используемым для сепарации световых потоков от левого и правого перспективных изображений. Классификация форматов стереоскопических изображений.

5. Способ воспроизведения стереоскопического изображения, использующий эффект Брюстера для поляризации светового потока от одного из перспективных изображений.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на девяти международных и трех межрегиональных научных конференциях:

Saratov Fall Meeting – International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics & Biophysics (Саратов, 2005, 2006, 2007),

VII Международной конференции «Прикладная оптика – 2006» (Санкт-Петербург, 2006),

XV International Symposium “Advanced Display Technologies – 2006” (Москва, 2006),

V Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2007» (Санкт-Петербург, 2007),

EURODISPLAY'07 – XXVII International Display Research Conference (Москва, 2007),

International Conference for Young Researchers “Wave Electronics and Its Applications in Information and Telecommunication Systems, Non-destructive Testing, Security and Medicine” (Санкт-Петербург, 2006, 2007),

Межрегиональных конференциях молодых ученых и специалистов «Молодежь и наука: итоги и перспективы» (Саратов, 2005, 2006, 2007).

Публикации

По результатам проведенного диссертационного исследования опубликовано 17 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, 6 статей в трудах международных конференций и сборниках научных работ, 2 патента, 6 тезисов докладов.

Личный вклад соискателя

Все результаты и положения диссертационного исследования получены лично соискателем. Постановка задач, обсуждение хода и результатов исследования проводились совместно с д.ф.-м.н., профессором В.В. Петровым.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 164 страницы текста, включая 32 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 153 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определена цель исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения и результаты, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена изложению основных понятий стереоскопии и решению проблемы классификации основных подходов к воспроизведению стереоскопических видеоизображений.

В параграфе 1.1 излагаются основные понятия, связанные со стереоскопическим зрением и стереоскопическими оптическими приборами.

В параграфе 1.2 представлено состояние проблемы классификации основных подходов к реализации стереоскопических видеосистем (СВС). На конкретных примерах рассмотрены типичные недостатки известных классификаций. Обнаружено, что известные классификации зачастую характеризуются отсутствием четко определенного предмета или признака, неполнотой, неоднозначностью, а также излишней привязкой к конкретным реализациям стереоскопических систем. Так, в распространенной классификации с выделением анаглифного, поляризационного, эклипсного и растрового методов пункт «растровый метод» слишком сильно привязан к конкретной конструкции экрана (растровой) и не охватывает СВС, использующие для безочковой стереопроекции большие линзы и зеркала.

В параграфе 1.3 решается задача выделения основных подходов к реализации современных СВС и составления классификации этих подходов, которая позволила бы сравнивать друг с другом точки зрения различных авторов, несмотря на отсутствие единой терминологии. Для этого проводится аналитический обзор публикаций по стереоскопии.

Для уточнения предмета классификации предложено анализировать каждый подход к созданию СВС как совокупность трех составляющих: 1) метода сепарации световых потоков от левого и правого изображений; 2) формата записи, хранения и воспроизведения стереоскопических видеоизображений; 3) технологии реализации выбранных метода и формата с конкретным аппаратным и программным обеспечением. Данная схема анализа

дает систему из трех координат, в которой удобно рассматривать и сравнивать различные подходы к созданию СВС, несмотря на отсутствие единой терминологии.

В отличие от известных работ, в качестве признака классификации методов стереоскопического видео были выбраны физические характеристики световой волны, по которым осуществляется сепарация световых потоков от левого и правого перспективных изображений. Это позволило составить минимальный список методов, достаточный для рассмотрения современных СВС: 1) метод Пульфриха – сепарация по интенсивности; 2) анаглифный метод – сепарация по частоте; 3) поляризационный метод – по поляризации; 4) эклипсный метод – по времени существования светового потока; 5) метод пространственного разделения – по направлению светового потока.

Для форматов стереоскопического видео использовано разделение на форматы с поочередным и с одновременным представлением частей стереопары. Всего выделено восемь основных форматов, используемых в современных СВС: чресстрочная стереопара; вертикальная стереопара; горизонтальная стереопара; альтернативная стереопара; смешанная стереопара; анаглифная стереопара; цветопеременная стереопара; двухпотоковая стереопара. Составлено краткое описание каждого метода и формата.

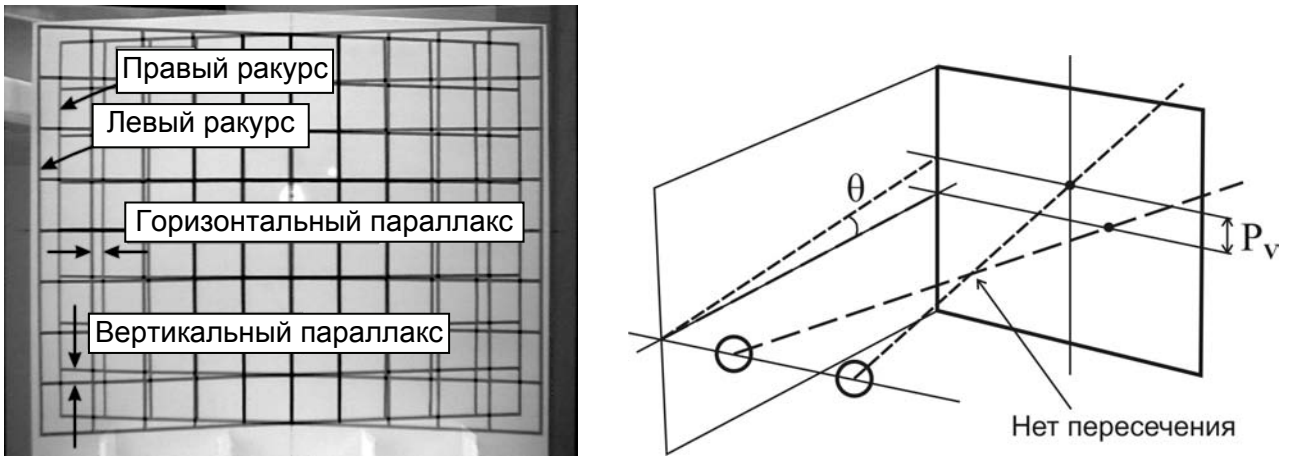
Представляется, что предложенная концепция анализа подходов к реализации СВС и составленные классификации методов и форматов стереоскопического видео позволят эффективнее использовать накопленный в стереоскопии материал для создания новых, еще более совершенных стереоскопических систем.

Глава 2 посвящена теоретическому исследованию новых возможностей устранения пространственных искажений в СВС со сходящимися оптическими осями объективов камер.

В параграфе 2.1 излагается современное состояние проблемы пространственных искажений в СВС, в том числе, в СВС со сходящимися оптическими осями. На основе анализа возможных путей решения этой проблемы предлагается новый принцип построения СВС со сходящимися осями, обеспечивающий устранение пространственных искажений. В параграфах 2.2 и 2.3 содержится аналитическое и графическое обоснование предложенного принципа, проводится сравнение результатов аналитического и графического решений.

При стереосъемке со сходящимися осями плоскости сенсоров двух камер не параллельны друг другу и не сопряжены с плоскостью конвергенции в оптических системах объективов камер. В результате левое и правое перспективные изображения получаются с переменным линейным увеличением. Например, изображения прямоугольника, расположенного в плоскости конвергенции, получаются на левом и правом снимках в виде несходственных трапеций. При совмещении таких изображений в общей плоскости наблюдения их сопряженные точки характеризуются ненулевым вертикальным параллаксом и горизонтальным параллаксом, несоответствующим пространственному

распределению точек исследуемой сцены (см. рис. 1а). При раздельном бинокулярном наблюдении стереопары ненулевой вертикальный параллакс затрудняет слитное восприятие стереоскопической картины (см. рис. 1б), а ошибочный горизонтальный параллакс приводит к искривлению наблюдаемого стереоскопического изображения.



а) б)

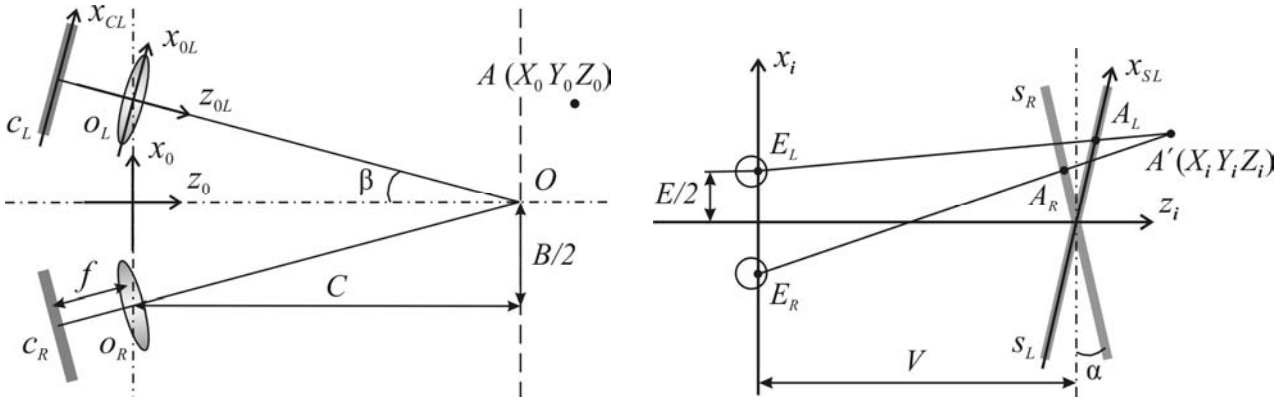
Рис. 1. Искажения в СВС со сходящимися оптическими осями объективов камер. (а) Ненулевой вертикальный и ошибочный горизонтальный параллаксы в стереопаре прямоугольной решетки, (б) Расхождение визирных линий при наблюдении стереопары с ненулевым вертикальным параллаксом: P_V – экранный вертикальный параллакс, θ - угловой вертикальный параллакс.

В известных работах, исследование пространственных искажений в СВС ограничивается случаем наблюдения левого и правого перспективных изображений в общей плоскости. В связи с этим в качестве основной причины возникновения вертикального параллакса и искривления указывается конвергенция осей объективов камер, а рекомендации по устранению искажений направлены, прежде всего, на изменение параметров системы съемки, вплоть до замены конвергентных камер параллельными.

Отдельные авторы отмечают, что возникновение искажений определяется не только схемой съемки, но и схемой воспроизведения стереопары, и указывают на возможность существования нестандартных схем воспроизведения, выходящих за рамки случая с общей плоскостью наблюдения. Однако, хотя такая возможность и допускается, отсутствуют обоснованные предложения конкретных нестандартных схем воспроизведения, которые позволили бы осуществить оптическую коррекцию пространственных искажений при воспроизведении стереопар от камер со сходящимися осями.

В данной диссертационной работе было предложено осуществлять такую коррекцию путем воспроизведения левого и правого перспективных изображений объекта в пересекающихся плоскостях наблюдения, что соответствовало бы геометрии съемки со сходящимися осями и приводило бы к компенсации пространственных искажений.

В параграфе 2.2 в рамках геометрической оптики положительно решена задача о возможности устранения вертикального параллакса и искривления стереоскопического изображения путем представления левого и правого перспективных изображений в пересекающихся плоскостях наблюдения.



а) б)

Рис. 2. Получение изображений левого и правого ракурсов объекта с помощью камер со сходящимися оптическими осями (а) и воспроизведение полученных изображений в пересекающихся плоскостях (б). o_L , o_R – объективы камер; c_L , c_R – сенсоры камер; s_L , s_R – плоскости наблюдения изображений левого и правого ракурсов; E_L , E_R – центры зрачков глаз наблюдателя.

Поставленная задача решалась следующим образом. Сначала для произвольной стереоскопической системы (см. рис. 2) со сходящимися оптическими осями объективов камер и пересекающимися плоскостями наблюдения левого и правого перспективных изображений были получены зависимости координат $(X_L Y_L Z_L)$ и $(X_R Y_R Z_R)$ сопряженных точек A_L и A_R стереопары в пространстве изображений от координат $(X_0 Y_0 Z_0)$ соответствующей точки A объекта в пространстве предметов. С помощью найденных зависимостей были сформулированы математические условия устранения углового вертикального параллакса и искривления стереоскопического изображения. Сформулированные условия имели вид уравнений относительно угла α пересечения плоскостей наблюдения левого и правого перспективных изображений. Решение данных уравнений дало значения угла α, при которых устраняется каждое из исследуемых искажений.

Условия устранения вертикального параллакса и искривления стереоскопического изображения были получены, соответственно, в виде выражений (1) и (2):

$$\sin\alpha = \frac{V}{M\,f_C}\,tg\beta\,, \tag{1}$$

$$\sin\alpha = \frac{BV}{2CM\,f_C}\,, \tag{2}$$

где α - угол пересечения плоскостей наблюдения левого и правого изображений, β - угол конвергенции оптических осей объективов камер, B – съемочный базис, f_C – фокусное расстояние объективов камер, M – увеличение кадра при воспроизведении изображений на экранах, V – дистанция наблюдения стереопары зрителем, C – дистанция конвергенции.

С учетом соотношения $\operatorname{tg}\beta = B/(2C)$ выражения (1) и (2) совпадают, и, таким образом, оба исследуемых искажения устраняются при одном и том же условии (1). При этом, согласно (1), угол α устранения искажений не зависит от глазного базиса E зрителя.

Кроме того, было показано, что условие (1) устранения искажений может быть записано через координаты $(X_{SL}Y_{SL})$ и $(X_{SR}Y_{SR})$ сопряженных точек A_L и A_R в системах координат левого и правого экранов в виде:

$$\sin\alpha = V\frac{\left(Y_{SL} - Y_{SR}\right)}{\left(Y_{SL}X_{SR} + Y_{SR}X_{SL}\right)}. \qquad (3)$$

Формула (3) позволяет определять угол α в практически важном случае, когда имеется стереопара, которую надо воспроизвести, но нет информации о параметрах системы съемки, с помощью которой она была получена.

Для независимой проверки аналитического решения (1) был создан графический метод нахождения угла α пересечения плоскостей наблюдения, требуемого для устранения искривления стереоскопического изображения плоскости конвергенции. С помощью этого метода в параграфе 2.3 проведено графическое исследование возможности оптической коррекции искривления стереоскопического изображения.

Результаты графического исследования подтвердили возможность устранения искривления стереоскопического изображения путем наблюдения левого и правого перспективных изображений в пересекающихся плоскостях. Расхождение значений угла α, при которых устраняется искривление, определенных по формуле (1) и графическим методом, не превышало 0,1°.

В Главе 3 в рамках коллинеарной оптики найдены неизвестные ранее условия устранения вертикального параллакса и искривления стереоскопического изображения для стереомикроскопов со сходящимися осями (стереомикроскопов Грену). Для повышения достоверности получаемых результатов поставленная задача была решена в рамках двух различных моделей формирования стереоскопического изображения.

Параграф 3.1 носит вводный характер и содержит обзор литературы по пространственным искажениям в стереоскопических световых микроскопах. В параграфах 3.2 и 3.3 в рамках различных моделей формирования стереоскопического изображения выводятся условия устранения пространственных искажений в стереомикроскопе Грену.

В первой модели положение стереоскопического изображения предметной точки находилось по пересечению двух визирных линий, каждая из которых определялась как прямая, проходящая через центр выходного зрачка

ветви стереомикроскопа в направлении вектора главного луча. В этом случае для нахождения визирных линий требовалось по известным направляющим векторам главных лучей $\boldsymbol{a_L}$, $\boldsymbol{a_R}$ в пространстве предметов найти направляющие векторы главных лучей $\boldsymbol{a'_L}$, $\boldsymbol{a'_R}$ в пространстве изображений.

Зная координаты направляющих векторов главных лучей в пространстве изображений, можно записать уравнения визирных линий и с их помощью получить условия устранения вертикального параллакса и искривления стереоизображения.

Во второй модели визирная линия определялась как прямая, проходящая через две точки: центр выходного зрачка ветви стереомикроскопа и соответствующее монокулярное изображение предметной точки. Здесь для нахождения визирных линий требовалось по известным координатам предметной точки A в пространстве предметов найти координаты ее левого и правого монокулярных изображений A_L и A_R в пространстве изображений.

Было показано, что вертикальный параллакс и искривление стереоскопического изображения в стереомикроскопе Грену устраняются при одном и том же условии, которое в рамках первой модели определяется выражением (4), а в рамках второй модели – выражением (5):

$$tg\varphi = \frac{1}{W_P}\, tg\psi\,, \tag{4}$$

$$tg\varphi = \frac{f}{p}\, tg\psi\,, \tag{5}$$

где φ и ψ - углы конвергенции оптических осей окуляров и объективов левой и правой ветвей стереомикроскопа соответственно, W_P – угловое увеличение в зрачках левой и правой ветвей стереомикроскопа, f – переднее эквивалентное фокусное расстояние оптической развертки ветви стереомикроскопа, p – координата входного зрачка развертки ветви стереомикроскопа относительно ее переднего главного фокуса.

При этом считалось, что левая и правая ветви стереомикроскопа идентичны, а их оптические развертки являются центрированными идеальными оптическими системами.

Было показано, что с учетом известных формул для углового увеличения оптической системы условия устранения пространственных искажений (4) и (5), полученные в рамках двух моделей формирования стереоскопического изображения, совпадают.

Отсутствие в условии (4)-(5) зависимости от координат предметной точки означает, что при его выполнении устранение пространственных искажений происходит одновременно для всех точек наблюдаемого стереоскопического изображения.

В Главе 4 в параграфах 4.1 и 4.2 проведено экспериментальное исследование возможности оптической коррекции вертикального параллакса в

СВС. В параграфе 4.3 предложен и реализован новый способ воспроизведения стереоскопических изображений.

Для экспериментального исследования пространственных искажений в СВС был создан лабораторный комплекс, обеспечивающий получение стереопар по схеме со сходящимися оптическими осями и раздельное бинокулярное наблюдение полученных перспективных изображений в пересекающихся плоскостях. Построенный экспериментальный комплекс состоял из системы стереоскопической съемки и системы стереоскопического воспроизведения.

В системе стереосъемки вместо двух конвергентных камер использовалась одна камера и эквивалентное вращение тестового объекта (см. рис. 3). Благодаря этому автоматически выполнялось требование идентичности левой и правой камер, существенно упростилась юстировка системы.

В системе воспроизведения пересечение плоскостей наблюдения левого и правого изображений обеспечивалось поворотом соответствующих мониторов в горизонтальной плоскости с совмещением их изображений по центру с помощью светоделительной пластины (см. рис. 4). Сепарация световых потоков от левого и правого изображений осуществлялась по поляризации.

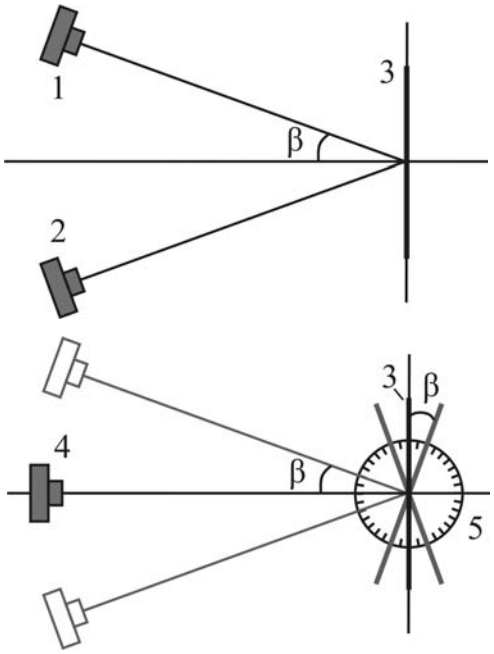


Рис. 3. Замена конвергенции камер (а) эквивалентным вращением объекта (б) в системе стереоскопической съемки. 1, 2 – левая и правая камеры, 3 – тестовая решетка, 4 – камера, 5 - транспортир.

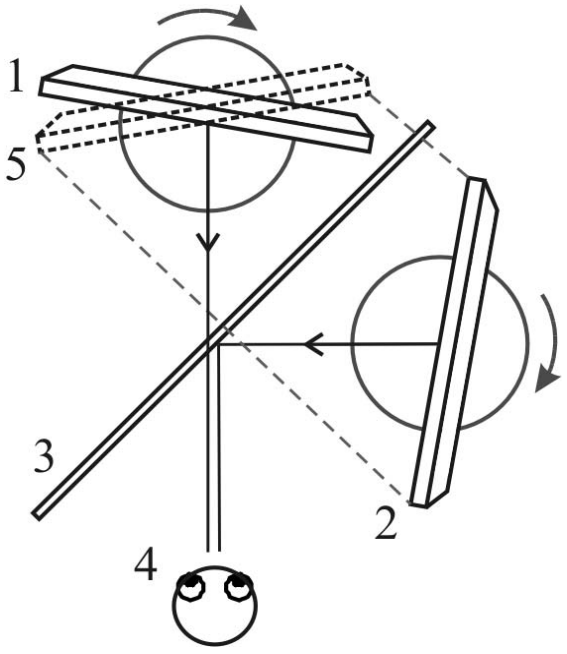


Рис. 4. Система стереоскопического воспроизведения. 1, 2 – мониторы с левым и правым изображениями, 3 – делительная пластина, 4 – зритель, 5 – изображение монитора 2. Средства сепарации не показаны.

Целью проводимых экспериментов стало исследование возможности оптической коррекции вертикального параллакса путем наблюдения левого и правого изображений в пересекающихся плоскостях.

В качестве отклика была выбрана степень двоения наблюдаемого изображения. В качестве варьируемых независимых переменных были выбраны угол β конвергенции камер при съемке и угол α пересечения плоскостей наблюдения левого и правого изображений при воспроизведении. При каждом из экспериментальных условий (α, β) проводилось по три наблюдения, в ходе которых наблюдатель оценивал степень двоения стереоскопического изображения по пятиуровневой шкале Лайкерта. Порядок проведения эксперимента был рандомизирован. Эксперимент по оптической коррекции вертикального параллакса был проведен с семью наблюдателями с нормальным зрением (по 240 измерений с каждым наблюдателем).

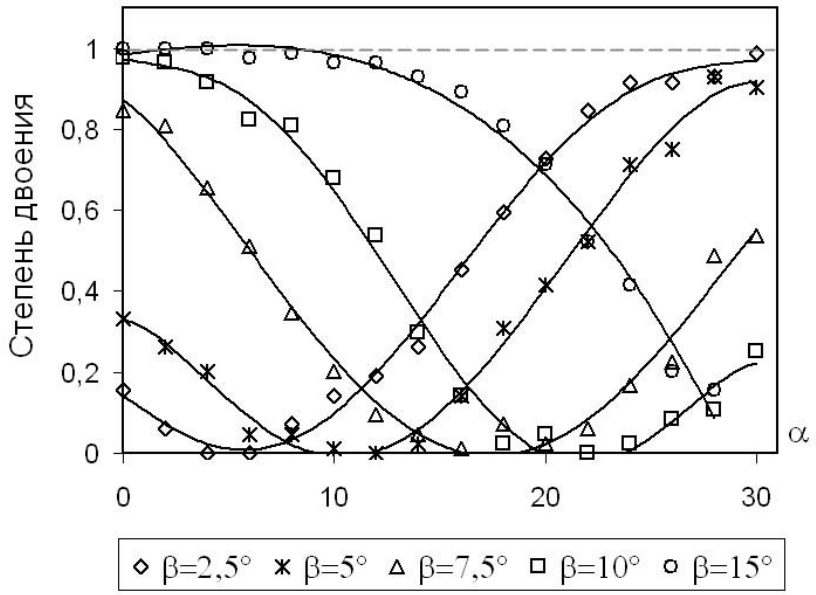


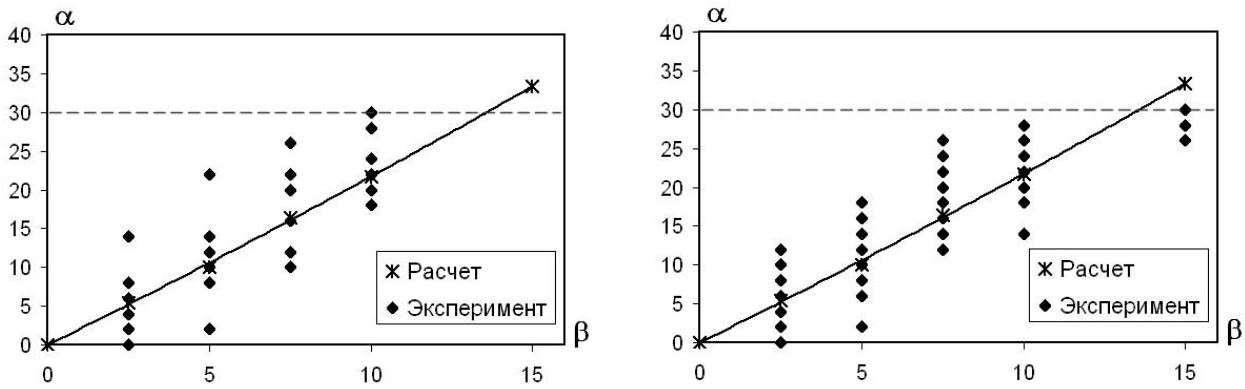
Рис. 5. Экспериментальные зависимости степени двоения наблюдаемого изображения от угла α пересечения плоскостей наблюдения левого и правого перспективных изображений, полученные при различных углах конвергенции β.

На рис. 5 представлены полученные графики зависимости степени двоения изображения, усредненной по всем наблюдателям, от угла α пересечения плоскостей наблюдения. Графики имеют четко выраженные минимумы, в которых степень двоения равна нулю. Эти минимумы и являются точками устранения вертикального параллакса. При увеличении угла конвергенции β минимумы степени двоения сдвигаются в сторону б*о*льших значений α, что соответствует найденному ранее условию устранения вертикального параллакса (1). Расчетные и экспериментальные значения угла α пересечения плоскостей наблюдения, при которых устраняется вертикальный параллакс, совпадают с точностью до 2°, что не превышает шага изменения угла α при проведении эксперимента.

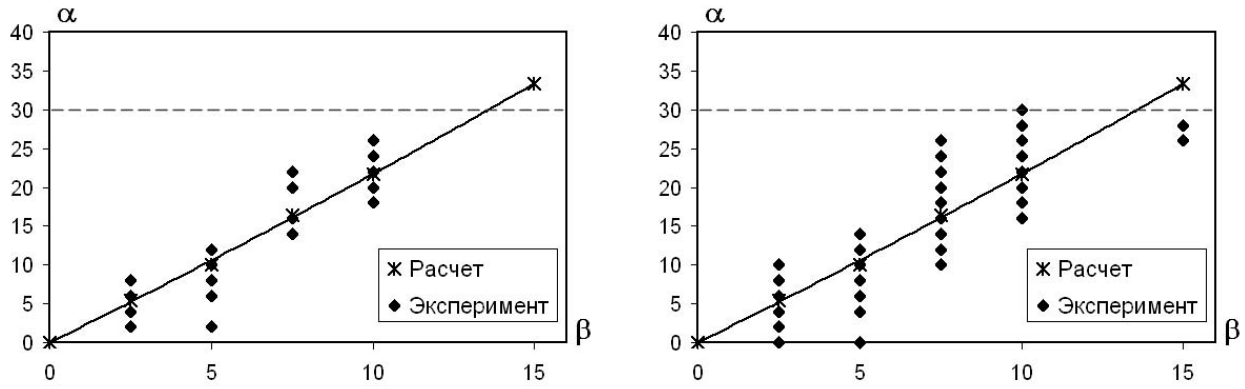
На рис. 6 представлены экспериментальные зависимости угла α пересечения плоскостей наблюдения, при котором изображение не двоилось, от угла β конвергенции камер для различных наблюдателей. Сплошной линией показана расчетная зависимость α от β, полученная по формуле (3).

Из зависимостей на рис. 6 можно сделать следующие выводы:

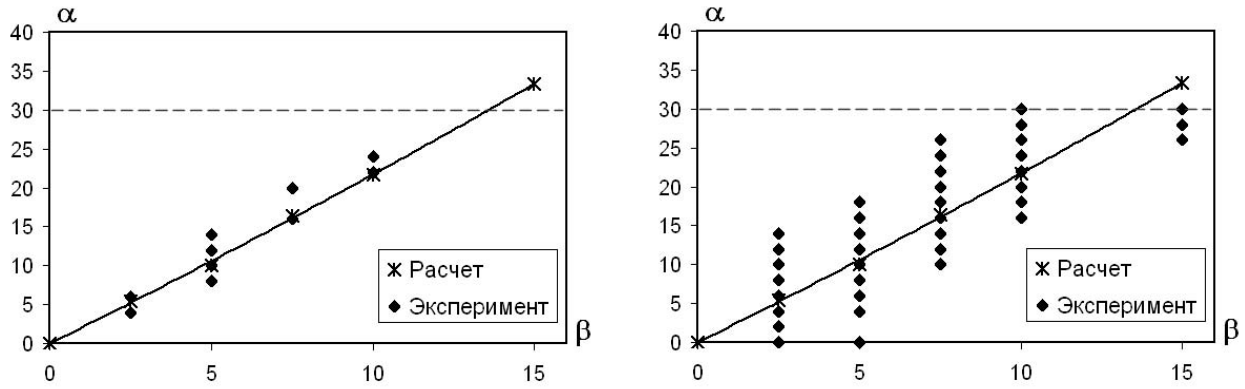
1) Для каждого значения угла конвергенции β существует целый диапазон значений угла α пересечения плоскостей наблюдения, при которых



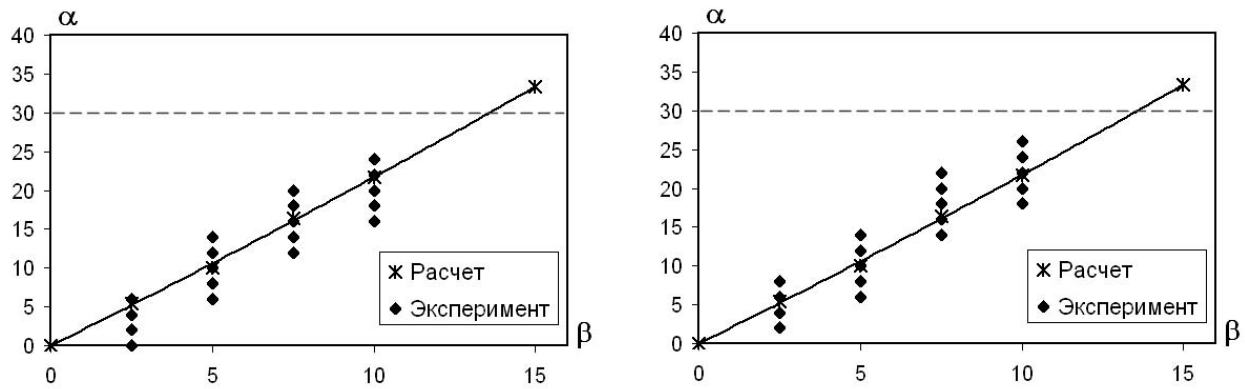
а) Наблюдатель № 1 б) Наблюдатель № 2



в) Наблюдатель № 3 г) Наблюдатель № 4



д) Наблюдатель № 5 е) Наблюдатель № 6



ж) Наблюдатель № 7 з) Усредненная зависимость

Рис. 6. Зависимости угла α пересечения плоскостей наблюдения левого и правого изображений, при котором устраняется двоение, от угла β конвергенции камер.

происходит устранение двоения. Этот факт объясняется наличием конечного порога диплопии и согласуется с современными представлениями о стереоскопическом зрении. Наличие такого диапазона позволяет иметь некоторый допуск на установку угла α при создании СВС с пересекающимися плоскостями наблюдения.

2) Диапазоны значений угла α, требуемых для устранения двоения при различных углах конвергенции β, частично перекрываются. Это значит, что при одном и том же значении угла α возможно устранение двоения в стереопарах, полученных при различных углах конвергенции β.

3) Расчетные значения угла α, требуемого для устранения вертикального параллакса, совпадают с экспериментально полученными значениями, причем даже в том случае (см. рис. 6д), когда имеется всего две экспериментальных точки. В среднем (см. рис. 6з) расчетный график проходит вблизи середин диапазонов значений угла α, в которых устраняется двоение.

В заключительном параграфе 4.3 четвертой главы предложен новый способ воспроизведения стереоскопических изображений, основанный на использовании эффекта Брюстера. Рис. 7а и 7б иллюстрируют известный и предложенный способы воспроизведения стереоскопических изображений. Известный способ хорошо работает с полупрозрачным зеркалом, однако дает слишком низкую интенсивность отраженного светового потока при использовании в качестве делителя прозрачной пластины. В параграфе 4.3 с помощью формул Френеля показано, что при воспроизведении стереоизображения с той же самой прозрачной пластиной согласно предложенному способу интенсивность отраженного светового потока возрастает по сравнению с известной схемой в два раза.

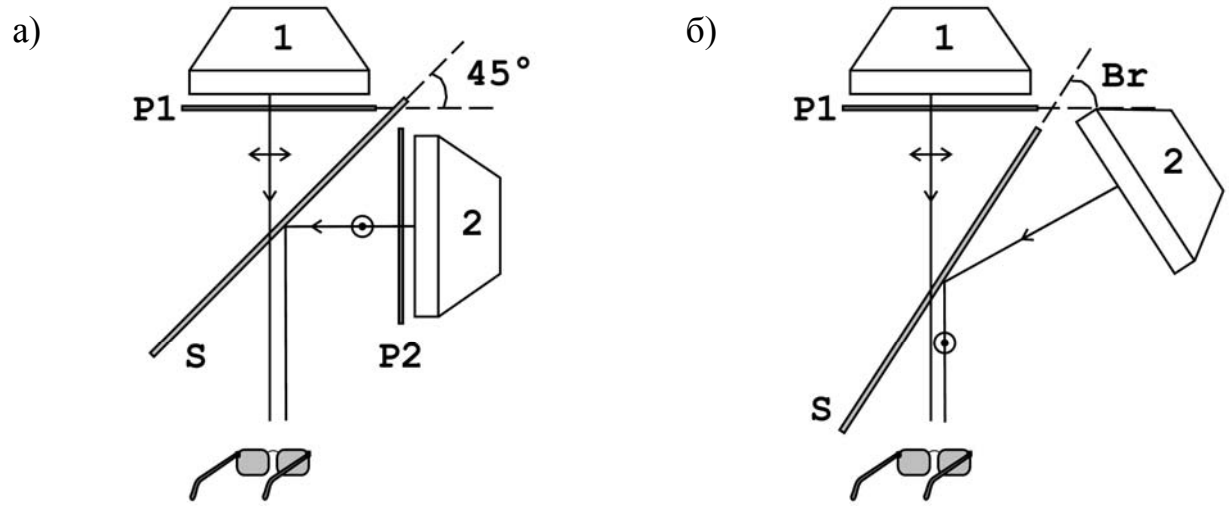


Рис. 7. Схемы воспроизведения стереоскопического изображения: (а) известная схема, (б) предложенная схема.

Таким образом, предложенный способ воспроизведения позволяет наблюдать стереоскопическое изображение при использовании в качестве делителя обычной стеклянной пластины, и в силу этого может быть легко

реализован в любой научной лаборатории или учебном практикуме, где имеются компьютеры. На устройства, реализующие данный способ, получены патент Российской Федерации № 2297730 на изобретение и патент № 53526 на полезную модель.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Впервые проблема пространственных искажений в стереоскопических видеосистемах исследована для случая, когда части стереопары воспроизводятся в пересекающихся плоскостях наблюдения, а не в общей плоскости.

2. Доказано, что при воспроизведении стереопары от камер со сходящимися оптическими осями возможна оптическая коррекция вертикального параллакса и искривления стереоскопического изображения путем наблюдения левого и правого перспективных изображений в пересекающихся плоскостях. Найдены формулы (1)-(3), определяющие угол пересечения плоскостей наблюдения, при котором осуществляется коррекция указанных искажений.

3. Создан графический метод, позволяющий находить угол пересечения плоскостей наблюдения левого и правого перспективных изображений, требуемый для устранения искривления стереоскопического изображения. С помощью созданного метода проведена независимая проверка аналитического решения (1).

4. Создан экспериментальный комплекс для исследования пространственных искажений, обеспечивающий получение стереопар по схеме со сходящимися оптическими осями объективов камер и раздельное бинокулярное наблюдение полученных перспективных изображений в пересекающихся плоскостях.

5. С помощью созданной экспериментальной установки получен эффект устранения вертикального параллакса при воспроизведении левого и правого перспективных изображений в пересекающихся плоскостях наблюдения. Впервые стереопара с вертикальным параллаксом, вызывающим сильное двоение при воспроизведении в общей плоскости, наблюдалась как единое объемное изображение благодаря воспроизведению в пересекающихся плоскостях.

6. Экспериментально исследована зависимость степени двоения стереоскопического изображения от угла пересечения плоскостей наблюдения левого и правого перспективных изображений.

7. Экспериментально исследована зависимость угла пересечения плоскостей наблюдения левого и правого перспективных изображений, требуемого для устранения двоения и вертикального параллакса, от угла конвергенции оптических осей объективов камер.

8. Получено условие (4) устранения вертикального параллакса и искривления стереоскопического изображения в стереоскопическом микроскопе Грену. Показано, что оба искажения устраняются при одном и том

же условии (4), причем для всех точек наблюдаемого стереоскопического изображения.

9. Составлена классификация современных подходов к реализации стереоскопических видеосистем, основанная на четком различении понятий метода, формата и технологии применительно к стереоскопическим видеосистемам. В качестве признака классификации методов сепарации частей стереопары использованы физические характеристики световой волны.

10. Предложен и реализован новый способ воспроизведения стереоскопических изображений, использующий эффект Брюстера для поляризации светового потока от одного из перспективных изображений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи и патенты

1. Гребенюк К.А., Петров В.В. Методы, форматы и технологии воспроизведения стереоскопических видеоизображений // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – №5. – С. 39-47.
2. Гребенюк К.А., Петров В.В. Устранение геометрических искажений в стереоскопических системах со сходящимися оптическими осями // Оптика и спектроскопия. – 2008. – Т. 104. – №4. – С. 698-703.
3. Гребенюк К.А., Петров В.В. Условие устранения пространственных искажений в стереоскопическом микроскопе Грену // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – №8. – С. 31-35.
4. Петров В.В., Гребенюк К.А. Стереоскопическая система визуализации для бинокулярного микроскопа // Сб. трудов VII Международной конференции «Прикладная оптика – 2006». – Т. 1. – СПб.: Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, 2006. – С. 306-310.
5. Petrov V.V., Grebenyuk K.A. Enhancement of Stereoscopic Images Quality: Optical Correction of Depth Plane Curvature // Proc. of the XV Int. Symposium “Advanced Display Technologies – 2006”. – Moscow, 2006. – P. 34-38.
6. Гребенюк К.А. Устройство для воспроизведения стереоскопических телевизионных изображений / Патент РФ на полезную модель № 53526, 2006.
7. Гребенюк К.А. Стереоскопический дисплей на основе эффекта Брюстера: геометрия и методика построения // Совершенствование подготовки учащихся и студентов в области графики, конструирования и стандартизации: Межвуз. науч.-методич. сб. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2007. – С. 190-194.
8. Петров В.В., Гребенюк К.А. Устройство для воспроизведения стереоскопических видеоизображений / Патент РФ на изобретение № 2297730, 2007.

9. Petrov V.V., Grebenyuk K.A. Optical Correction of Depth Plane Curvature Image Distortion // SPIE Proc. – 2007. – Vol. 6637.
10. Petrov V.V., Grebenyuk K.A. Improved Stereoscopic Imaging with Converged Camera Configuration // SPIE Proc. – 2007. – Vol. 6536.
11. Grebenyuk K.A., Petrov V.V. Stereoscopic Image without Keystone Distortion // Proc. of the 27th Int. Display Research Conf. (EURODISPLAY-2007). – Moscow, 2007. – P. 140-142.

Тезисы докладов

12. Гребенюк К.А. Трехмерный дисплей для стереоскопического микроскопа // Материалы III научно-практической конференции «Молодежь и наука: итоги и перспективы». – Саратов: Изд-во Сарат. мед. ун-та, 2005. – С. 32-33.
13. Гребенюк К.А. Устранение искривления плоскости экрана при трехмерной визуализации // Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Молодежь и наука: итоги и перспективы». – Саратов: Изд-во Сарат. мед. ун-та, 2006. – С. 66-67.
14. Grebenyuk K.A., Petrov V.V. Stereoscopic Video Methods Classification in Terms of Physical Characteristics of the Light Wave // Proc. of the IX Int. Conf. “Wave Electronics and Its Applications”. – St. Petersburg, 2006. – P. 48.
15. Grebenyuk K.A., Petrov V.V. Obtaining Undistorted Stereoscopic Image from Converged Cameras // Proc. of the X Int. Conf. “Wave Electronics and Its Applications”. – St. Petersburg, 2007. – P. 60.
16. Гребенюк К.А., Петров В.В. Повышение качества изображения в стереоскопических системах со сходящимися оптическими осями // Труды V Международной конф. «Оптика-2007». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – С. 227.
17. Гребенюк К.А. Повышение качества изображения в стереоскопическом микроскопе со сходящимися оптическими осями // Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Молодежь и наука: итоги и перспективы». – Саратов: Изд-во Сарат. мед. ун-та, 2007. – С. 43.

ГРЕБЕНЮК КОНСТАНТИН АЛЕКСАНДРОВИЧ

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СО СХОДЯЩИМИСЯ ОПТИЧЕСКИМИ ОСЯМИ

Автореферат

Подписано в печать 16. 07. 08 Формат 60x84/16 Бумага типографская офсет.
Гарнитура Times New Roman Печ. Л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 138-Т

Отпечатано с готового оригинал-макета
Типография Саратовского государственного университета
имени Н.Г. Чернышевского
410012 г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112 а
Тел.: (8452) 27-33-85