

На правах рукописи

Савельев Владимир Валентинович

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
АВТОСТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

05.13.18 - Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН).

Научный консультант

Твердохлеб Пётр Емельянович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты:

Ильин Валерий Павлович

доктор физико-математических наук,
профессор,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт вычислительной
математики и математической геофизики СО
РАН, главный научный сотрудник
лаборатории Вычислительной физики

Гужов Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
Новосибирский государственный
технический университет, профессор
кафедры Системы сбора и обработки данных

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Конструкторско-
технологический институт научного
приборостроения (КТИ НП) СО РАН

Защита состоится «_____» _____ 2014 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2014 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Ильичёв Л.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Современные оптические методы формирования изображений позволяют воспроизводить объёмные сцены при помощи трёхмерных (3D) дисплеев.

Аппаратура и методы отображения трёхмерной информации постоянно совершенствуются. Современная тенденция развития направлена на максимальное приближение к естественному восприятию. Компромиссным решением сегодняшнего дня могут служить стереоскопические¹ методы. В настоящее время на рынок вышли компании Samsung, LG, Sony, Sharp, Philips и др., что способствует ещё более широкому использованию 3D дисплеев в промышленности и в общественных коммуникациях. Однако необходимость использования специальных очков представляет неудобство для широкого пользователя. Поэтому в диссертации рассматриваются объёмные и многокурсные автостереоскопические изображения, предоставляющие визуальное восприятие без очков.

В работах [1] – [6] других авторов дан обзор существующих автостереоскопических методов. Улучшение отдельных параметров дисплеев, оказывающих влияние на визуальное качество, описывается в [3], а использование слежения за положением наблюдателя описано, например, в [4]. Вопросы согласования факторов восприятия рассмотрены в [7]. Эффект муара рассмотрен известными авторами И. Амидором [11] и К. Паторским [12]. При этом слежение сопряжено с дополнительной математической обработкой; зависимость между аккомодацией и конвергенцией оказалась более слабой, чем это принято считать; некоторые аспекты методов формирования усовершенствованы; в отдельных ситуациях снижен эффект муара, однако единый практический подход к минимизации этого эффекта отсутствует.

Актуальность темы исследования обусловлена следующими факторами: 1) недостаточным предоставлением факторов естественного зрительного восприятия в практических устройствах, 2) качеством изображения 3D дисплеев, часто более низким, чем у современных двумерных дисплеев, 3) влиянием паразитных (нежелательных) эффектов, 4) необходимостью свободного перемещения наблюдателя. В связи с этим актуальным представляется проведение комплексного исследования факторов, оказывающих основное влияние на качество, в том путём математического моделирования. Актуальность задачи формирования 3D изображений и оценки их визуального качества подтверждается также значительным интересом, проявленным со стороны ведущих мировых компаний - производителей 3D дисплеев.

Цель работы и задачи исследований. Целью работы является разработка методов формирования, оценки и улучшения визуального качества

¹ Стереоскопические изображения состоят из двух изображений, левого и правого; как правило, для их рассматривания требуются специальные очки. Многокурсные включают несколько промежуточных ракурсов; как и стереоскопические, они предназначены для определенного положения наблюдателя. Объёмные изображения можно свободно рассматривать естественным образом с произвольного направления. Автостереоскопические изображения не требуют очков.

автостереоскопических изображений. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1) Разработать метод формирования 3D изображений в ограниченном объеме физического пространства, систему управления формированием 3D изображений в реальном времени и комплекс компьютерных программ для вычислительного эксперимента.

2) С целью обеспечения режима реального времени выделить характерные структурные элементы многоракурсных изображений (МИ) и предложить эффективные методы формирования и обработки МИ.

3) Построить теорию минимизации эффекта муара. Разработать систему компьютерного моделирования эффекта муара и на ее основе провести комплексное исследование этого эффекта с целью улучшения визуального качества 3D изображений.

Основные положения, выносимые на защиту

1) Разработанный метод последовательного послойного формирования монохроматических 3D изображений для зрительного восприятия человека, основанный на комбинированном акустооптическом и электромеханическом (КАОЭМ) сканировании физического объема под управлением компьютерных программ для вычислительного эксперимента, позволяет отображать в реальном времени объекты "каркасного" типа сложностью до нескольких тысяч ребер на кадр при частоте регенерации 25 Гц.

2) Образцы выявленных структурных элементов (вокселей на дискретных расстояниях) позволяют осуществить формирование и обработку МИ (в частности, восстановление положения 3D объектов в пространстве) новыми способами с использованием эффективных алгоритмов.

3) Созданная теория позволяет выполнить минимизацию в спектральной области с использованием траекторий, что представляет собой основу нового метода моделирования. Реализованная система компьютерного моделирования позволяет осуществить выбор параметров при проектировании дисплеев. В результате выполненного комплексного исследования эффекта муара достигается стабильное улучшение визуального качества. Предложенный принцип построения оптической системы позволяет формировать 3D изображений на новом физическом принципе – эффекте муара.

Научная новизна исследований. В процессе проведения исследований впервые получены новые научные результаты:

♦ Экспериментально подтверждена возможность визуализации в реальном времени объемных изображений волнометрического типа (ОИВТ) каркасных объектов информативностью до $8 \cdot 10^4$ точек на кадр с использованием КАОЭМ сканирования области пространства. Это выполнено новым методом формирования изображения под управлением разработанных компьютерных программ для вычислительного эксперимента, где используется эффективный численный алгоритм генерации линий.

♦ Построены образцы вокселей (ОВ) и на их основе предложены новые методы формирования и обработки МИ, реализованные в виде эффективных

алгоритмов. Построена система оценки визуального качества на базе критерия смешанных ракурсов.

◆ Предложено минимизировать влияние эффекта муара при помощи спектральных траекторий новым методом моделирования. Разработан математический метод, комплекс программ и система компьютерного моделирования эффекта муара в спектральной области. В результате комплексного исследования найдены значения угла установки линзы, при которых эффект муара минимален. Впервые предложен принцип построения 3D изображений на основе эффекта муара.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Синтез и анализ МИ на основе ОВ для дискретных расстояний позволяет создавать новые методы формирования изображений. Предложенный критерий даёт возможность оценивать визуальное качество при большом количестве источников света. Созданная теория минимизации эффекта муара основана на новом подходе к моделированию – спектральных траекториях в комплексной плоскости (СТКП) и позволяет проводить минимизацию по четырём конструкционным параметрам (угол, соотношение сторон и размеров).

Практическая ценность состоит в том, что оценка параметров автостереоскопического изображения (например, наличие переходных помех и визуальное качество) может быть выполнена на стадии проектирования дисплея. Предложенный метод формирования МИ с использованием ОВ требует меньших вычислительных затрат, чем вычисление ракурсов, в силу чего он может использоваться в дисплеях реального времени. Система оценки визуального качества может найти применение в стандартизации 3D дисплеев. Созданная система компьютерного моделирования эффекта муара предназначена для практического использования разработчиками. Дано практическое экспериментальное подтверждение возможности визуализации ОИВТ в реальном времени, что позволило предложить способ тестирования зрительного аппарата человека на основе объёмного дисплея; способ защищен патентом РФ.

Результаты исследований автора использованы в Институте автоматики и электрометрии СО РАН при выполнении нескольких НИР в 1996 - 2003 гг.: «Исследование методов построения многопоточковых 3-D интегрально-оптических структур с перестраиваемыми оптическими связями (стандартные шины, коммуникационные сети, интегральные схемы, однородные вычислительные структуры)», № гос. рег. 01.9.60 013069; «Физико-технические основы 2-D и 3-D лазерных технологий (новые материалы и элементы для лазерных технологий, сверхразрешение, технологии оптической памяти, синтеза объёмных моделей и изображений, микро- и наноструктурирования материалов); развитие на их основе базовых лазерных технологий производства новых элементов, приборов и систем двойного применения», № гос. рег. 01.9.60 013066; а также при написании монографии [8] «3D лазерные информационные технологии» под ред. проф. П.Е. Твердохлеба – Новосибирск, 2003 г. Результаты работы использованы автором в учебных образовательных процессах (семинары по информационным дисплеям и по обработке 3D изображений) в Университете

Ханъян (Hanyang University), Сеул, Корея в 2010 - 2014 гг.

Личный вклад соискателя. Автором разработаны новые способы формирования и обработки МИ на основе ОВ, предложена оценка визуального качества по смешанным ракурсам и принцип формирования 3D изображений на основе эффекта муара. Автору принадлежит идея нового метода моделирования эффекта муара на основе СТКП, представленная в диссертации теория минимизации эффекта муара в пространственной и спектральной областях, а также алгоритмы реального времени, система компьютерного моделирования эффекта муара, а также компьютерные программы, средства управления и тестирования по трём главам.

Несомненно, следует поблагодарить соавторов за их очень важный вклад и уточнить, что эксперименты по формированию тестовых изображений на макете объёмного дисплея выполнены совместно с проф. П.Е. Твердохлебом, к.т.н. А.В. Трубецким и к.т.н. Ю.А. Щепёткиным. Часть экспериментов по моделированию, в том числе эксперименты, связанные с оценкой качества, выполнена совместно с проф. Соном (Son Jung-Young), а эксперимент «туннель» подготовлен, проработан и выполнен совместно с к.т.н. Е.Ф. Пенем. Эксперименты по аналитическому подходу к минимизации эффекта муара выполнены совместно с проф. Соном, а по спектральному - с д-ром Кимом (Kim Sung-Kyu), вместе с которым также поставлены и проведены эксперименты по эффекту муара с ненулевым зазором.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 12 международных конференциях²: на конференциях Международного общества оптики и фотоники (SPIE) в 1997 – 2014 гг. в России и США, на Международных совещаниях по информационным дисплеям (IMID) в 2009 – 2014 гг. в Корею и на Международных семинарах по дисплеям (IDW) в 2011 – 2012 гг. в Японии.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 15 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах с индексом цитирования SCI (такие издания как Optics Express и Applied Optics) и 7 статей – в журналах SCI-E. Отдельные статьи автора цитируются в литературе многократно³. Часть результатов опубликована в монографии издательства Springer [9].

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав с выводами и заключения. Она изложена на 171 странице текста, включает 56 рисунков, 4 приложения и содержит список литературы из 183 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость темы диссертации, формулируется её цель и задачи, раскрывается

² Среди указанных имеются приглашенные (invited) и программные (keynote) доклады.

³ Статья в журнале Optical Engineering 2003 г. цитирована 75 раз, в Applied Optics 2004 г. – 59 раз, а статьи в Journal of Display Technology 2005 и 2008 гг. – 31 и 14 раз. Индекс цитирования автора (h-index) составляет 6 или 7 (по системам Google Scholar и Scopus).

структура работы и основные положения, выносимые на защиту. Приводится обзор литературы, анализ состояния и тенденций развития современных способов формирования 3D изображений.

Первая глава посвящена разработке метода последовательного послойного формирования 3D изображений в ограниченном x , y , z -объёме пространства и программ для вычислительного эксперимента с использованием ОИВТ. Вычислительный эксперимент в трёхмерном пространстве основан на использовании нового метода формирования трёхмерного изображения. В главе описана разработка (с участием автора) макета объёмного 3D дисплея с подвижным рассеивающим экраном в 1996 – 97 гг. в ИАиЭ СО РАН [Автометрия, 1997. – № 2. – С. 10 – 12] и реализация программных средств. Автором

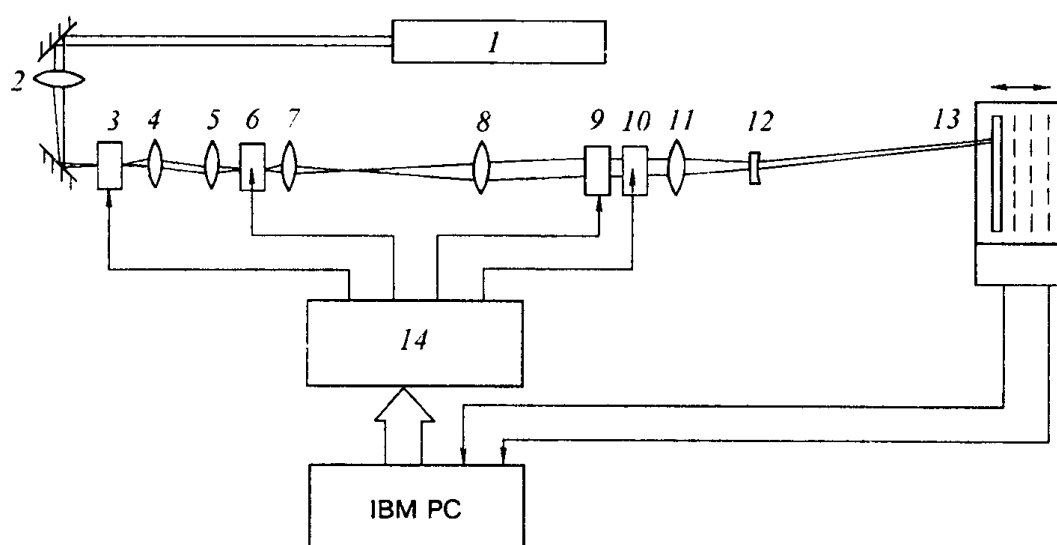


Рис. 1. Метод формирования объёмного изображения

разработаны, в частности, средства тестирования и управления, компьютерные программы для вычислительного эксперимента в реальном времени, в том числе расширяемый алгоритм генерации пространственных линий. Средства вычислительного эксперимента включают программу отображения, компилятор графических файлов, драйвер и визуальный интерпретатор. Листинги алгоритма и программ реального времени приведены в приложениях.

Реализовано две версии программ для вычислительного эксперимента: первая – с предварительной обработкой графической информации и непосредственным доступом прикладной программы к устройству, вторая – с обработкой информации в реальном времени и доступом прикладной программы к устройству через драйвер. Первая версия оформлена как компилятор простого языка описания 3D сцен (и потому требует компиляции графических файлов), вторая – как комплекс программ, включающий интерпретатор файлов DXF, т.е. работающий полностью в реальном времени. Такой проблемно-ориентированный комплекс предоставляет возможность моделирования разнообразных трёхмерных структур и наблюдения в

пространстве несколькими наблюдателями одновременно.

Послойное формирование 3D изображений реализовано путём последовательной выдачи сечений отображаемого объекта на подвижный светорассеивающий экран, причём каждое сечение формируется высокоскоростной КАОЭМ системой отклонения лазерного пучка. Акустооптический дефлектор обеспечивает 256×256 дискретных положений луча, а по дальности имеется 313 положений экрана. Подвижный полупрозрачный экран изготовлен из органического стекла со светорассеивающим покрытием без послесвечения. Экран площадью 15×10 см² и толщиной 0,2 см совершает возвратно-поступательное движение в пределах $\pm 2,5$ см с частотой до 25 Гц. Эффективная рабочая площадь экрана 10×10 см² обеспечивает механическое сканирование объёма пространства $10 \times 10 \times 5$ см³ (область изображения). Блок-схема показана на рис. 1. Такая аппаратура вместе с разработанной автором системой управления позволила реализовать новый способ формирования 3D изображений в пространстве. Черно-белая фотография ОИВТ показана на рис. 2.

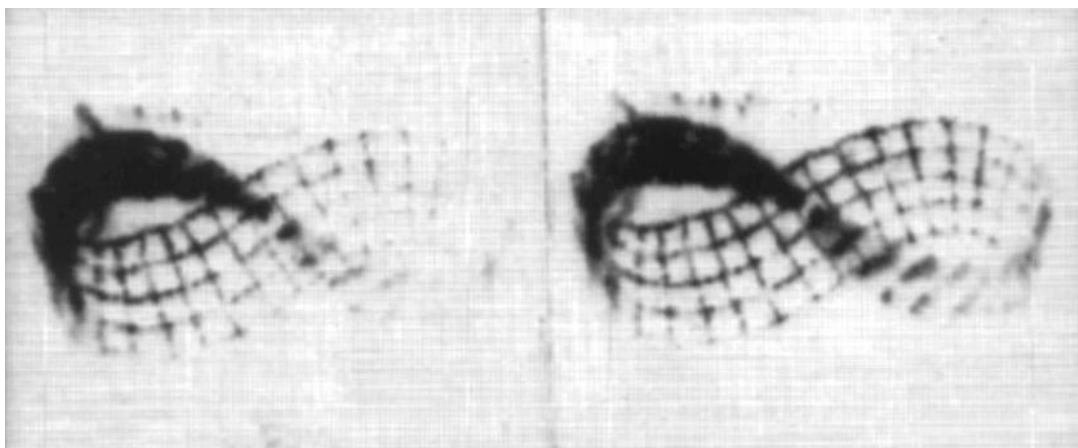


Рис. 2. Фотография объёмного изображения волнометрического типа (негатив)

Одно из основных требований к системе управления – обеспечение вывода графической информации в реальном времени синхронно с положением подвижного экрана. При этом вывод всех точек в текущей плоскости должен завершиться до прихода следующего синхроимпульса плоскости и/или кадра. В связи с этим в представленном макете ОИВТ выбрано «каркасное» (wireframe) представление, при котором изображение пространственного объекта строится из рёбер. Это позволяет сократить время вывода изображения по сравнению с генерированием граней, поскольку каркасное изображение формируется из точек пересечения рёбер с текущей плоскостью сечения.

Для представления объектов в трёхмерном пространстве требуются увеличенные по сравнению с двумерным случаем объёмы памяти, и поэтому существенным становится тщательное распределение используемой компьютерной памяти; вопрос решен компактным описанием пространственных объектов, а также использованием расширенной памяти.

Важным элементом программной системы формирования 3D

изображений является способ поточечной генерации линий (рёбер объектов), что выполнялось при помощи алгоритма Брезенхама, модифицированного автором для трёх измерений. Такой алгоритм может быть расширен на случай N измерений, а после его завершения не требуется сортировка по плоскостям. В процессе решения этой задачи были также решены следующие программные проблемы: распределение памяти при отсутствии аппаратного видео буфера, эффективное каркасное представление (рёбра), выбор систем координат и относящихся к ним преобразований, простой входной язык (3DD), компилятор подмножества формата DXF, поддержка драйвером файловой системы в расширенной памяти (EMS).

Выполнены эксперименты по формированию в реальном времени разнообразных тестовых 3D изображений с реальной трёхмерностью, устойчивых для глаза человека, при информационной ёмкости до $8 \cdot 10^4$ точек на кадр (до 1 – 2 тысяч рёбер в каркасном представлении): правильных многогранников, упрощённых моделей машин, архитектурных сооружений и других 3D объектов.

Сформированные пространственные объекты отчётливо воспринимаются наблюдателями в трёх измерениях. У ОИВТ отсутствует конфликт между конвергенцией и аккомодацией. Количество наблюдателей не ограничено. Полноценное 3D изображение доступно для наблюдения в пределах угла обзора $\pm 75^\circ$ от нормали к рассеивающему экрану с обеих его сторон, т.е. практически с любого направления, кроме близкого к тангенциальному. Изображения монохроматические (длина волны 0,63 мкм) с двумя уровнями яркости.

Качество ОИВТ по разрешающей способности приблизительно соответствует типичному видеомонитору VGA или печатающему устройству Epson: 2,5 – 3 точки/мм при частоте регенерации 25 Гц. Одним из дополнительных применений объёмного дисплея на принципе ОИВТ является тренировка визуального аппарата человека.

В дальнейшем развитие технических возможностей способно предоставить полутоновые и цветные объёмные изображения; цветные, в частности, можно формировать с использованием трёх лазеров. Учитывая, что дисплейные устройства с экранами небольших размеров переживают в настоящее время бурный рост, важным в практическом отношении представляется вопрос сокращения общих габаритов системы.

Во **второй главе** представлены новые методы формирования и обработки МИ, предназначенные для режима реального времени; методы разработаны на основе выявленных автором характерных структурных элементов (т.е. ОВ для дискретных расстояний). Кроме того, дана общая геометрическая характеристика многокурсовых изображений и система оценки визуального качества МИ по количеству смешанных ракурсов. Устройство автостереоскопического дисплея схематически проиллюстрировано на рис. 3.

Автором предложено единое аналитическое описание МИ на основе типичной структуры автостереоскопического дисплея. Хотя это выполнено

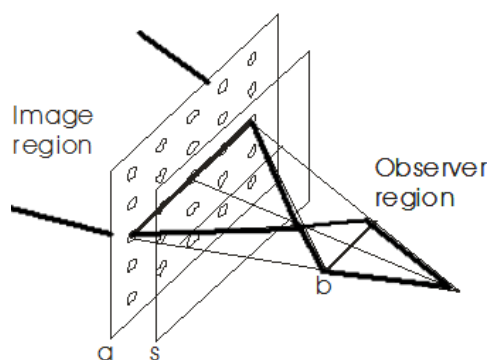


Рис. 3. Схема типичного автостереоскопического дисплея

сравнительно недавно, основные свойства многоракурсных изображений были использованы автором совместно с к.т.н. Е.Ф. Пенем при построении многоракурсных стереограмм [10] в 1999 г.

Характерные выявленные ОВ представлены на рис. 4. Образцы используются для генерации МИ по геометрическому описанию векторного объекта, а также для восстановления расположения объектов в трёхмерном

пространстве по их МИ. Обработка МИ производится с использованием построенных автором ОВ методами синтеза и анализа, ранее не известными в мировой литературе. В частности, при генерации (синтезе) МИ векторного объекта по плоскостям вычисление ракурсов не требуется, и поэтому потенциальное быстродействие в несколько раз выше, чем при генерации ракурсов. При формировании МИ используются не фотографические или элементарные изображения, как это обычно принято в настоящее время, а геометрическое описание векторного 3D объекта.

При формировании по плоскостям, начиная от самой дальней, в случае визуального перекрытия объектов, ОВ налагаются друг на друга так, что этим обеспечивается перекрытие (occlusion) дальних объектов ближними. Это даёт возможность не заботиться о видимости объектов в различных ракурсах, а генерировать МИ путём прямого наложения ОВ. В этом отношении данный метод формирования сходен с ОИВТ, рассмотренным в первой главе.

На основе детального анализа смешивания ракурсов в области наблюдения автором предложена система оценки визуального качества МИ по обратной величине количества смешанных ракурсов. Система оценки качества позволяют исключить неперспективные в практическом отношении варианты методов формирования МИ; оценка подтверждена в экспериментах.

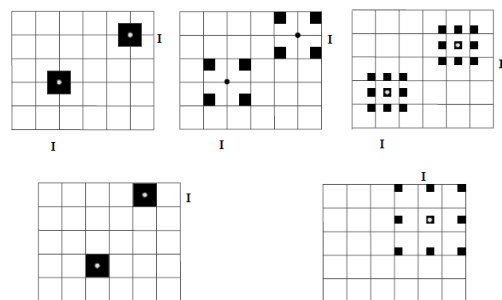


Рис. 4. Изображения образцов вокселей

Пример фотографии 3D изображения с направления, близкого к оси, показан на рис. 5; это туннель квадратного сечения с перспективно сходящимися углами между стенами. Количество плоскостей 10, общее количество вокселей 9 тысяч. Устройства, созданные по описанным в этой главе принципам, заявлены и запатентованы в нескольких странах.

В третьей главе рассматривается компьютерное моделирование эффекта муара в автостереоскопических изображениях. Рассмотрены прямая минимизация, СТКП и влияние конечного расстояния. Описаны реализованные средства компьютерного моделирования, с использованием которых выполнено комплексное исследование эффекта муара в автостереоскопических дисплеях.

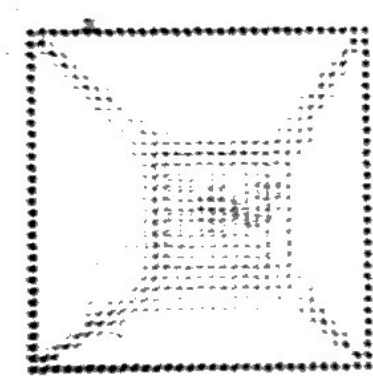


Рис. 5. Фотография сформированного изображения тунеля (негатив)

Эффект муара – оптическое явление, возникающее в регулярных или почти регулярных прозрачных слоях, «когда повторяющиеся структуры (такие как экраны и решётки) налагаются друг на друга или наблюдаются на просвет» [11]. Наложение приводит к возникновению комбинационных частот [12], причём низкие пространственные частоты визуально проявляются как относительно широкие тёмные и светлые полосы, а структура исходных слоёв при этом

зачастую неразличима. Схема наблюдения эффекта муара показана на рис. 6.

Характерное для автостереоскопических дисплеев равномерное разделение оптических элементов на повторяющиеся единицы с кратными периодами, а также ненулевое расстояние между оптическими элементами способствуют расширению зоны видимости эффекта муара при перемещении наблюдателя, что приводит к заметному снижению визуального качества 3D изображений в широкой области перед экраном.

Важность минимизации эффекта муара в автостереоскопических дисплеях была отмечена автором в 2003 г., по-видимому, впервые в литературе. Для минимизации эффекта муара автором разработаны два подхода: первый – прямой аналитический, второй – наглядный геометрический. Для автостереоскопических изображений минимизацию требуется выполнить не только для определённого значения параметра, скажем, для расстояния от экрана 1,5 м, а в некотором диапазоне, например, для расстояний в диапазоне от 1 до 2 м.

Первый подход позволил получить формулы минимизации в синусоидальном приближении. В этом случае синус оптимального угла α является корнем уравнения четвёртой степени

$$(1 + 2\sigma^2 + \sigma^4)s^4 - 8\sigma^3s^3 + 2(\sigma^2 - 1)s^2 + 8\sigma^3s + (1 - 4\sigma^2) = 0 \quad (4)$$

где $s = \sin \alpha$. Приблизительно этот угол может быть выражен как $\alpha'(\sigma) = \arctan 1/2\sigma$,

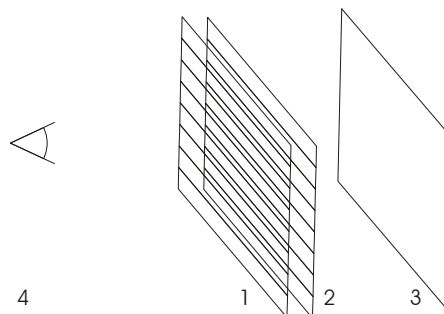


Рис. 6. Наблюдение эффекта муара (1, 2 – периодические решетки, 3 – осветитель, 4 – наблюдатель)

где σ – характеристическое отношение пикселя экрана. Различие между точным и приближённым решениями – менее 1%. Возможности подхода ограничены одной – двумя спектральными компонентами.

Второй подход дает возможность графически исследовать ход траекторий в спектральной области и выделить из них приближающиеся к началу координат. Количество гармоник – в пределах 10. Основное уравнение в комплексной плоскости выглядит следующим образом:

$$T = (k\sigma_1 + il) + (m\sigma_2 + in)\rho e^{i\alpha} \quad (5)$$

Спектральные траектории были использованы в отдельных областях исследований, однако этого не было сделано ни применительно к эффекту муара, ни к моделированию. В качестве иллюстрации аналитического подхода приведем составную поверхность минимизации для синусоидальных волн (рис. 7а), геометрического – спектральные траектории для различных элементарных решёток (рис. 7б).

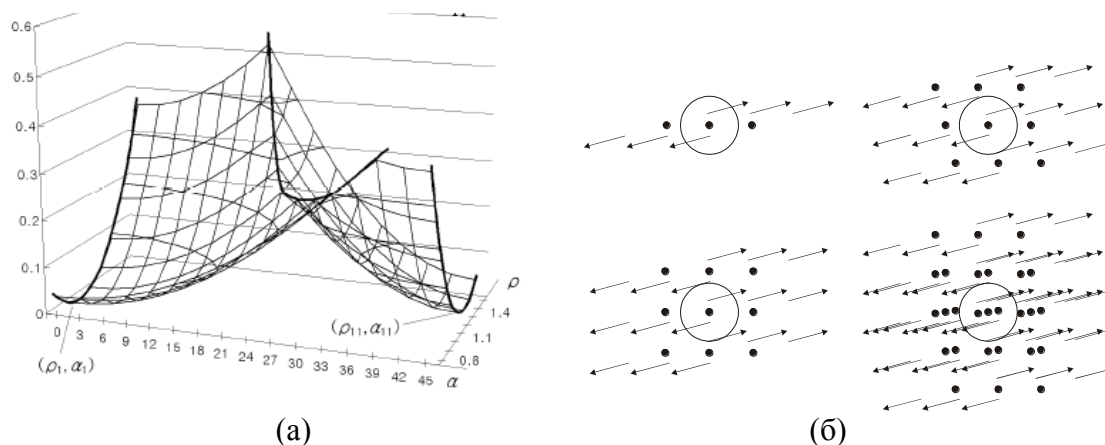


Рис. 7. (а) Составная поверхность минимизации эффекта муара в синусоидальном приближении; (б) СТКП

Широкому потребителю важно постоянно высокое качество, т.е. устойчивость минимизации. Для обеспечения этого – в отличие от классического способа описания эффекта муара – были выполнены исследования эффекта муара на конечном расстоянии при ненулевом зазоре между решётками. Показано, что и в этом случае эффект муара также может быть описан при помощи СТКП.

Существо настоящего исследования состоит в том, чтобы снизить эффект муара в условиях, провоцирующих его появление. С целью улучшения визуального качества автостереоскопических изображений в диссертации выполнено комплексное исследование эффекта муара и создана теория минимизации, которая позволяет определить диапазоны минимизации по четырём параметрам. Практическим воплощением теории являются разработанные средства компьютерного моделирования на базе СТКП, которые дают возможность проведения комплексного исследования с учётом конечного расстояния; это обеспечивает повышение качества автостереоскопических изображений. Практический пример минимизации приведен на рис. 8.

Система моделирования эффекта муара работает в обзорном и детальном



(а)

(б)

Рис. 8. Пример минимизации эффекта муара. (а) фотография экрана автостереоскопического дисплея до минимизации, (б) после минимизации

вариации параметров (положение наблюдателя по двум координатам, зазор и угол установки лентичулярной линзы).

Заключение. Основные результаты работы и выводы

1) Решена задача формирования 3D изображений в реальном времени новым методом на основе последовательного послойного сканирования объёма при помощи высокоскоростной КАОЭМ системы отклонения лазерного пучка с параллельным перемещением экрана в объёме $10 \times 10 \times 5$ см³. На основе реализованных численных алгоритмов разработан комплекс компьютерных программ для вычислительного эксперимента с использованием ОИВТ. Экспериментально доказана возможность отображения в трёхмерном пространстве объёмных сцен, содержащих до нескольких тысяч рёбер при частоте регенерации 25 Гц.

2) На основе выявленных автором структурных элементов предложены ОВ. Методы формирования и обработки МИ предложены автором впервые. Реализованные эффективные алгоритмы формирования и обработки МИ практически применимы в системах реального времени. Оценка визуального качества подтверждена в численном эксперименте при количестве точечных источников света до 60. Экспериментально продемонстрированы синтез и анализ векторных объектов, содержащих до 150 вокселей, в области общим объёмом более 10 тысяч вокселей. В вычислительных экспериментах по анализу ошибка определения дискретной дальности наблюдалась не более чем в 3% случаев.

3) На базе предложенной автором теории минимизации эффекта муара разработан комплекс программ имитационного моделирования. Моделирование и минимизация выполняются с использованием СТКП, что предложено и реализовано автором впервые. Построена система компьютерного моделирования и выполнено математическое моделирование эффекта муара с количеством решеток более 4, что позволяет создавать высококачественные дисплеи, свободные от эффекта муара. Проведено комплексное исследование эффекта муара. Минимизация эффекта муара выполнена по 4 параметрам в диапазоне расстояний от 1 до 2 м и углов от 0 до 90°. Разработанные математические методы компьютерного моделирования и минимизации

подтверждены экспериментально (соответствие экспериментальных и теоретических данных в пределах 3 - 5%). Предложен новый принцип построения системы формирования 3D изображений на основе эффекта муара.

Таким образом, при работе над диссертацией решены важные научно-технические задачи по разработке системы имитационного компьютерного моделирования, по выполнению научных исследований с использованием математического компьютерного моделирования, а также по созданию и развитию новых методов формирования и обработки МИ, новых принципов построения систем отображения информации. Полученные результаты составляют научную основу для усовершенствования существующих и создания новых эффективных методов формирования и обработки 3D изображений реального времени, а также для развития систем компьютерного моделирования. Подтверждённая экспериментально возможность формирования ОИВТ указывает один из путей построения 3D дисплея с экраном небольших размеров. Предложены два метода формирования изображений с автоматическим перекрытием дальних объектов, реализованы алгоритмы реального времени. Теория минимизации и система компьютерного моделирования открывают новые возможности для стабильного улучшения визуального качества. Результаты комплексного исследования эффекта муара позволяют формировать 3D изображения [13], [14] на основе эффекта муара – физическом принципе, ранее не использованном в системах отображения 3D информации.

Список цитированных работ

1. Blundell B.G., Schwarz A.J. Creative 3-D Display and Interaction Interfaces: A Trans-Disciplinary Approach / New York, John Willey & Sons. – 2007. – 371 p.
2. Lueder E. 3D Displays / New York, John Willes and Sons. – 2012. – 264 p.
3. Son J. Y. Autostereoscopic imaging systems based on special optical plates // Three-Dimensional Television, Video, and Display Technologies / B. Javidi, F. Okano, Eds. – Springer, 2002. – Chap. 2. – pp. 35-66.
4. Hong J., Kim Y., Choi H.-J., Hahn J., Park J.-H., Kim H., Min S.-W., Chen N., Lee B. Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues, // Applied Optics. – 2011. – vol. 50. – No 34. – pp. H87-H115.
5. Martinez-Cuenca R., Saavedra G., Martinez-Corral M., Javidi B. Progress in 3-D multiperspective display by integral imaging // Proc. IEEE. – 2009. – vol. 97. – No 6. – pp. 1067-1077.
6. Holliman N.S. Three-dimensional display systems // Handbook of Optoelectronics / J. P. Dakin and Brown, Eds. – London, U.K., Taylor & Francis. – 2006. – ch. C2.6. – pp. 1067-1100.
7. Hori H., Shiomi T., Kanda T., Hasegawa A., Ishio H., Matsuura Y., Omori M., Takada H., Hasegawa S., Miyao M. Comparison of Accommodation and Convergence by Simultaneous Measurements during 2D and 3D Vision Gaze // Lecture Notes in Computer Science. – 2011. – vol. 6773. – pp. 306-314.
8. Беликов А.Ю., Савельев В.В., Твердохлеб П.Е. Моделирование процессов распространения световых лучей в градиентном оптическом волноводе // 3D лазерные информационные технологии / Под ред. Твердохлеба П.Е. – Офсет, Новосибирск, 2003. – С. 480-538.
9. Park M.-C., Park S.-J., Saveljev V.V., Kim S.-H. Synthesizing 3-D images with voxels // 3D Imaging Visualization and Display / B. Javidi et al. (Eds.). – Springer, 2009. – pp. 207-225.
10. Pen E F., Savel'ev V.V. Multiaspect stereograms for acquisition of hard copy of three-dimensional images // Pattern Recognition and Image Analysis. – 1999. – vol. 9, No 1. – pp. 161-164.

11. Amidror I. The Theory of the Moiré Phenomenon, Volume I: Periodic Layers / London, Springer. – 2009. – 529 p.
12. Patorski K., Kujawska M. Handbook of the Moiré Fringe Technique / Elsevier Science. – 1993. – 432 p.
13. Saveljev V., Kim S.-K. A moiré display // Proceedings of Proceedings of 19th International Display Workshops (IDW). – 2012. – pp. 1875-1877.
14. Saveljev V., Kim S.-K. A 3D moiré display // Proceedings of 33rd International Display Research Conference (EuroDisplay). – 2013. – pp. 54-56.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

А. Статьи в журналах ВАК:

- A1. Савельев В.В., Твердохлеб П.Е., Трубецкой А.В., Щепёткин Ю.А. Формирование трёхмерных изображений с помощью каскадного высокоскоростного акустооптического дефлектора // Автометрия. – 1997. – № 2. – С. 11-14 (имеется перевод на англ. яз.: Optoelectronics, Instrumentation, and Data Processing. – 1997. – № 2, pp. 10-12).
- A2. Kim S.-S., Sohn K.-H., Saveljev V., Pen E. F., Son J.-Y., Chun J.-H. A full parallax three-dimensional imaging system based on a point light source array // Japanese Journal of Applied Physics. – 2001. – vol. 40, part 2. – pp. 4913-4915.
- A3. Son J.-Y., Saveljev V., Choi Y.-J., Bahn J.-E., Kim S.-K., Choi H.-H. Parameters for designing autostereoscopic imaging systems based on lenticular, parallax barrier, and integral photography plates // Optical Engineering. – 2003. – vol. 42, No 11. – pp. 3326-3333.
- A4. Son J.-Y., Saveljev V., Kim J.-S., Kim S.-S., Javidi B. Viewing Zones in Three-Dimensional Imaging Systems Based on Lenticular, Parallax-barrier, and Microlens-array Plates (journal cover) // Applied Optics. – 2004. – vol. 43, No 26. – pp. 4985-4992.
- A5. Saveljev V., Son J.-Y., Javidi B., Kim K.-T., Kim S.-S., Kim D.-S. Moiré minimization condition in three-dimensional image displays // Journal of Display Technology – 2005. – v. 1, No 2. – pp. 347-353.
- A6. Son J.-Y., Saveljev V., Kim S.-K., Javidi B. Pixel patterns for voxels in contact-type 3D imaging systems // Japanese Journal of Applied Physics. – 2006. – vol. 45, No 2A. – pp. 798-803.
- A7. Saveljev V., Son J.-Y., Kim S.-H., Kim D.-S., Park M.-C., Song Y.-C. Image mixing in multiview three-dimensional imaging systems // Journal of Display Technology. – 2008. – vol. 4, No 3. – pp. 319-323.
- A8. Saveljev V., Son J.-Y., Chun J.-H., Kwack K.-D., Cha K.-H. About a moiré-less condition for non-square grids // Journal of Display Technology. – 2008. – vol. 4, No 3. – pp. 332-339.
- A9. Saveljev V., Shin S.-J. Layouts and cells in integral photography and point light source model // Journal of the Optical Society of Korea. – 2009. – vol. 13, No 1 – pp. 131-138.
- A10. Saveljev V. Orientations and branches of moiré waves in three-dimensional displays // Journal of the Korean Physical Society. – 2010. – vol. 57, No 6. – pp. 1392-1396.
- A11. Saveljev V., Kim S.-K. Simulation of moiré effect in 3D displays // Journal of the Optical Society of Korea. – 2010. – vol. 14, No 4. – pp. 310-315.
- A12. Saveljev V. Characteristics of moiré spectra in autostereoscopic three-dimensional displays // Journal of Display Technology. – 2011. – vol. 7, No 5. – pp. 259-266.
- A13. Saveljev V., Kim S.-K. Simulation and measurement of moiré patterns at finite distance // Optics Express. – 2012. – vol. 20, No 3. – pp. 2163-2177.
- A14. Saveljev V., Kim S.-K. Theoretical estimation of moiré effect using spectral trajectories // Optics Express. – 2013. – vol. 21, No 2. – pp. 1693-1712.
- A15. Saveljev V., Kim S.-K. Reference Functions for Synthesis and Analysis of Multiview and Integral Images // Journal of the Optical Society of Korea. – 2013. – vol. 17, No 2. – pp. 148-161.

Б. Публикации в тезисах и трудах конференций:

- B1. Saveljev V.V., Tverdokhle P.E., Trubetskoi A.V., and Shchepetkin Yu.A. Laser system for real-time visualization of three-dimensional objects // Proceedings of SPIE. – 1998. – vol. 3402. – pp. 222-224.

- Б2. Pen E.F., Saveljev V.V. Multi-image stereograms in 3D visualization // Proceedings of SPIE. – 1999. – vol. 3733. – pp. 459-461.
- Б3. Kim S.-S., Sohn K.-H., Saveljev V.V., Pen E.F., Son J.-Y., Chun J.-H. Optical design and analysis for super multiview three-dimensional imaging system // Proceedings of SPIE. – 2000. – vol. 4297. – pp. 222-226.
- Б4. Son J.-Y., Javidi B., Saveljev V. Synthesizing 3D images based on voxels (invited paper) // Proceedings of SPIE. – 2003. – vol. 5202. – pp. 1-11.
- Б5. Son J.-Y., Saveljev V. V., Park M.-C., Kim D.-S., Kim S.-K. Disparity-based quality function for autostereoscopic display devices (keynote paper) // Proceedings of SPIE. – 2007. – vol. 6778. – p. 677804.
- Б6. Saveljev V., Son J.-Y., Woo S.-B., Park M.-C., Lee D.-S., Kwack K.-D. Quality estimation for visual image in autostereoscopic 3D display // Proceedings of SPIE. – 2009. – vol. 7329. – p. 732900.
- Б7. Saveljev V., Son J.-Y., Kwack K.-D. Geometry-based quality metric for multi-view autostereoscopic 3D display // Proceedings of International Meeting on Information Display (IMID). – 2009. – pp. 1014-1017.
- Б8. Saveljev V. Geometric projective model of autostereoscopic 3D Display (invited paper), Proceedings of 10th International Meeting on Information Display (IMID). – 2010. – pp. 247-248.
- Б9. Saveljev V., Kim S.-K. Basic characteristics of spectral trajectories of moiré waves in 3D displays // Proceedings of 11th International Meeting on Information Display (IMID) – 2011. – pp. 434-435.
- Б10. Saveljev V., Kim S.-K. Finite-distance moiré patterns in autostereoscopic 3D displays // Proceedings of 18th International Display Workshops (IDW) – 2011. – pp. 1841-1844.
- Б11. Saveljev V., Kim S.-K. Finite-distance moiré effect in rotated gratings // Proceedings of 13th International Meeting on Information Display (IMID). – 2013. – p. 83.
- Б12. Saveljev V., Kim S.-K. Computer simulation of moiré waves in autostereoscopic displays basing on spectral trajectories // Proceedings of SPIE. – 2014. – vol. 9117. – p. 91170W.

В. Патенты

- В1. Способ тестирования стереоскопического зрительного анализатора : Пат. 2199938 Рос. Федерации. : МПК А61В3/08, А61Н5/00 / Пальчикова И.Г., Савельев В.В., Твердохлеб П.Е., Трубецкой А.В.; заявитель и патентообладатель ИАиЭ СО РАН. – № 99109767/14; заявл. 05.05.1999; опубл. 02.20.2001.
- В2. Multi-view image display system : Патент 10-0389249 Республика Корея : Int. Cl. 6 G02B 27/22 / Son J.Y., Choi Y.J, Ban J.E., Saveliev V., Pen E. F. – № 10-2000-23181; заявл. 29.04.2000; опубл. 08.11.2001.
- В3. Устройство для получения стереоскопических изображений : Заявка 2000106879 Рос. Федерации / Пен Е.Ф., Савельев В. В. ; заявитель ИАиЭ СО РАН. – № 2000106879/28; заявл. 18.02.2002.
- В4. Multi-view image display system : Патент. 6,606,078 США : Int. Cl. G09G 5/00 / Son J.Y., Choi Y.J, Ban J.E., Saveliev V., Pen E. F. – № 09/84,861; заявл. 27.04.2001; опубл. 12.08.2003.