

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)

На правах рукописи

САВЕЛЬЕВ Владимир Валентинович

**МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
АВТОСТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

01.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Твердохлеб Пётр Емельянович

Новосибирск – 2014

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Компьютерные программы для вычислительного эксперимента с использованием объёмного дисплея и метод последовательного формирования 3D изображения	32
1.1. Общая характеристика метода послойного формирования	37
1.2. Тестовые средства управления	40
1.3. Программные средства для вычислительного эксперимента	44
1.4. Качество изображения и возможное применение объёмного дисплея в медицине	47
1.5. Эксперименты	49
Выводы к главе 1	53
Глава 2. Формирование, обработка и оценка качества многоракурсных изображений	56
2.1. Геометрические характеристики многоракурсных изображений	58
2.2. Эффективные методы формирования и обработки на основе образцов вокселей	74
2.3. Оценка визуального качества	84
Выводы к главе 2	91
Глава 3. Компьютерное моделирование и минимизация эффекта муара в автостереоскопических изображениях	93
3.1. Прямая минимизация	95
3.2. Влияние конечного расстояния	108
3.3. Спектральные траектории в комплексной плоскости	111
3.4. Средства компьютерного моделирования эффекта муара	117
3.5. Комплексное исследование эффекта муара	124

3.6. Принцип построения оптической системы для формирования 3D изображений на основе эффекта муара	132
Выводы к главе 3	135
Заключение	138
Список литературы	146
Приложение А. Модифицированный алгоритм Брезенхама	158
Приложение Б. Пример файла 3DD	164
Приложение В. Структуры данных драйвера	165
Приложение Г. Функции на языке ассемблера	166

Введение

Обзор и анализ современного состояния. Современные методы отображения трёхмерных (3D) изображений позволяют воспроизводить трёхмерные сцены, как для персонального, так и для профессионального использования в промышленности и научных исследованиях. Многие зарубежные фирмы (Samsung, LG – Корея, Sony, Sharp – Япония, Philips – Голландия и др.) уже предлагают на рынок индивидуальным покупателям широкий спектр разнообразных дисплеев, включая трёхмерные [1]. В России (напр., ФИАН) также ведутся исследования по 3D дисплеям и их элементам [2]. Это способствует ещё более широкому использованию 3D дисплеев в промышленности и в общественных коммуникациях.

Аппаратура и методы отображения 3D информации постоянно совершенствуются. Современная тенденция развития направлена на максимальное приближение к естественному восприятию. Компромиссным решением сегодняшнего дня могут служить стереоскопические методы, однако необходимость использования специальных очков представляет неудобство для широкого пользователя. Стереоскопические изображения состоят из двух изображений, левого и правого; как правило, для их рассматривания требуются специальные оптические приспособления (очки). Многокурсовые 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 ношения специальных очков. Поэтому в диссертации рассматриваются объёмные и многокурсовые автостереоскопические изображения [3] – [9], предоставляющие визуальное восприятие без очков.

В первую очередь из числа многокурсных рассмотрены дисплеи, обеспечивающие наиболее естественное восприятие, при котором все условия естественного стереоскопического восприятия выполняются, как например, совпадение условий аккомодации и конвергенции для глаз наблюдателя [10]. Это достигается в объёмных дисплеях волнометрического типа [11]. В 1995 г. в ИАиЭ СО РАН (г. Новосибирск) проводились работы по созданию устройств отображения 3D визуального пространства в реальном времени [12]. Сложность разработки заключалась не только в надлежащем использовании имеющихся в то время компонентов, но и в согласовании характеристик визуального восприятия человека с техническими характеристиками отдельных узлов макета объёмного дисплея, а также в обеспечении совместной работы этих узлов. Рабочий объём представлял собой пространственную область размером $10 \times 10 \times 5$ см³, в которой необходимо было строить изображения реальной трёхмерности в реальном времени. В этом макете по двум пространственным координатам осуществлялась акустооптическая развертка, а по третьей координате – механическая. Такой дисплей предоставляет наблюдателю 3D изображения в пределах ограниченного объёма 3D пространства. В диссертации описывается разработанный метод последовательного послойного синтеза 3D изображения в реальном времени, программная среда для управления этим дисплеем и его тестирования, а также компьютерные программы для вычислительного эксперимента.

Кроме объёмных дисплеев практический интерес представляют и многокурсные автостереоскопические [3]. У многокурсных изображений – в отличие от бинокулярных стереоскопических – визуальное восприятие происходит путём, близким к естественному, причём наблюдателю без очков предоставляется определённая свобода перемещения, поскольку здесь все

ракурсы доступны для одновременного наблюдения. Автостереоскопическое изображение, как правило, формируется чисто оптическими средствами и пространственной развертки, подобной объёмному дисплею, не требуется; а при наличии достаточно большого экрана, область изображения потенциально неограничена.

В диссертации разработаны новые методы формирования и обработки многокурсных изображений, проведена оценка визуального качества таких изображений.

Стереоскопические дисплеи характеризуются воспринимаемой глубиной изображения, величиной и формой области наилучшего восприятия и т.п. Не последнее место в характеристике 3D дисплеев занимают и т.н. перекрёстные помехи (crosstalk), показывающие относительный уровень фонового или другого ненужного изображения поступающего из паразитного визуального канала. В диссертации описывается, как в автостереоскопических дисплеях типичной конструкции можно оценивать перекрёстные помехи геометрически.

Одним из физических эффектов, воздействующих на качество изображения, является эффект муара, который снижает визуальное качество изображения в дисплеях и потому считается негативным фактором. Это делает гарантированное устранение такого эффекта необходимым этапом разработки и тестирования 3D автостереоскопических дисплеев. На основе разработанной автором теории предложены два подхода к минимизации эффекта муара, недопустимого в высококачественных дисплеях, а также выполнено компьютерное моделирование и комплексное исследование эффекта муара в многокурсных изображениях.

Объёмные дисплеи волюметрического типа. Для решения задач отображения информации с реальной трёхмерностью перспективными

представляются, в частности, объёмные дисплеи волнометрического типа. Известны объёмные дисплеи со статическим сканированием физического объёма и с динамическим [11]. Дисплеи первого типа состоят из двух или нескольких прозрачных дисплейных панелей, работающих напросвет. В дисплеях второго типа объём сканируется по одной из координат механически плоской или криволинейной светорассеивающей поверхностью. Объёмное изображение находится в пространстве между крайними неподвижными панелями либо между крайними положениями сканирующей поверхности или её огибающей.

В системах с динамическим сканированием формирование частичных изображений в сечениях часто ведётся путём двухкоординатного отклонения лазерного пучка дефлектором света, а формирование совокупности сечений – посредством сдвига воспроизводящего экрана по глубине пространства [13]. Объёмное воспроизведение информации с параллельным смещением экрана предложено и реализовано автором в составе коллектива лаб. 1-3 ИАиЭ СО РАН [14], [15]. В диссертации рассматривается 3D объёмный дисплей волнометрического типа, основанный на последовательном формировании совокупности сечений объёмного объекта или сцены при возвратно-поступательном перемещении сканирующего экрана.

Благодаря инерции человеческого глаза, изображение каждой из коротких (0,5 мкс) импульсных вспышек лазера мощностью 55 мВт продолжает некоторое время (практически – до следующего кадра) восприниматься визуально в том месте, где находился сканирующий экран в соответствующее время ранее. Визуальный аппарат человека строит представление о пространственной сцене из элементов, отображенных в разное время. Такое свойство визуального аппарата позволяет провести размещение видимых точек в пределах трёхмерной области изображения, и

они будут восприниматься как цельный пространственный зрительный образ.

Известными на время выполнения работы методами объёмного воспроизведения были дисплейные системы, основанные на вращении некоторой (чаще всего геликоидальной) поверхности вокруг оси. Такие методы описаны в книгах [4], [11], а пионерским из них (т.е. первым объёмным дисплеем волюметрического типа) считается электронно-лучевой дисплей с электродом, вращающимся внутри электровакуумной трубки [5]. Затем были предложены более развитые способы воспроизведения пространственной графической информации, обеспечивающих визуальное стереоскопическое восприятие [16], [17]. Однако при этом не следует забывать, что в дисплеях с вращающимся экраном имеется мёртвая зона около оси вращения (в самом центре области изображения), что значительно снижает их возможности. Поэтому поиск альтернативных методов продолжается. Здесь также будет уместно сказать, что кроме упоминания о принципиальной возможности, ни один из авторов упомянутых книг [4], [11] не сообщает ни об одной реализации способа с параллельным смещением.

После 2000 г. созданием и исследованием объёмных изображений в стопке управляемых жидкостно-кристаллических пластин занимался ФИАН [18]. Кроме предложенных после нашей работы методов [19], [20], основанных на использовании нескольких жидкостно-кристаллических дисплейных панелей, к объёмным методам можно также отнести метод «плавающих» изображений [21] и синтетический дисплей (depth-fusion) [22], [23], основанные соответственно на оптическом переносе изображения в область пространства перед экраном и на особенностях восприятия уровней яркости в разных плоскостях.

Существенным признаком объёмного дисплея является отсутствие визуального блокирования дальних точек ближними в случае, когда они

находятся на одной линии – т.е. эффективная прозрачность изображения. Возникает она потому, что все точки в каждой плоскости выводятся и воспринимаются независимо. Затем, когда производится переход к следующей плоскости, предыдущие точки физически исчезают, но их образы сохраняются в зрительной памяти наблюдателя. При этом точки, находящиеся на одной линии визирования на разных расстояниях, хотя и были воспроизведены в разное время, но независимо, и поэтому представлены в воспринимаемой визуальной картине одинаковым образом; это трактуется как прозрачность. В нашем случае визуальная характеристика элемента изображения, получаемого от единичного импульса лазера – частично прозрачная светлая точка в тёмном пространстве; размер такого элемента около 0,4 мм.

У объёмного дисплея размерность области предметов (исходного пространства) и размерность области изображения (отображаемого пространства) равны трём, тогда как у плоского (двумерного) одна из этих размерностей равняется двум. Для представления трёхмерных объектов в трёхмерном пространстве требуются увеличенные по сравнению с двумерным случаем объёмы памяти. Разница в размерности влечёт за собой необходимость создания более эффективных алгоритмов формирования и обработки базовых 3D геометрических элементов для объёмного дисплея; более существенным становятся тщательное распределение используемой компьютерной памяти. Возможность практического формирования устойчивых (для глаза человека) 3D изображений в реальном времени также была неясной. Для практической реализации был разработан метод последовательного послойного синтеза 3D изображения в реальном времени в ограниченном x, y, z -объёме пространства ($10 \times 10 \times 5 \text{ см}^3$), учитывающий эти особенности. В частности, для генерации пространственных линий

разработан и реализован трёхмерный аналог алгоритма Брезенхама. Подтверждённый экспериментом результат даётся в диссертации, в том числе описание программных средств управления и тестирования объёмного дисплея волнометрического типа, а также компьютерных программ для вычислительного эксперимента с использованием объёмного дисплея.

Методы формирования и обработки автостереоскопических многоракурсных изображений. В многоракурсных дисплеях [24] - [26] (в отличие от стереоскопических [4]) бинокулярное визуальное восприятие происходит путём, близким к естественному - без очков. При этом для формирования автостереоскопических изображений, как правило, не требуется механической развертки, подобной объёмному дисплею волнометрического типа.

В случае, когда изображения, воспринимаемые правым и левым глазом, отличаются незначительно, они могут быть интерпретированы как виды одного и того же предмета или сцены с двух близких направлений. Тогда эти изображения объединяются визуальным аппаратом человека в единый пространственный образ и возникает стереоскопический эффект. В этом заключается механизм возникновения пространственной иллюзии при рассматривании автостереоскопических изображений.

При рассматривании многоракурсных изображений текущая пара видимых наблюдателем изображений фактически выбирается расположением его глаз в пространстве, и поэтому в принципе достаточно расположить изображения ракурсов в пространстве надлежащим образом. Тогда слежение за положением наблюдателя не необходимо, хотя в последнее время оно иногда используется [27], [28] с целью дополнительного повышения качества изображения.

В работах [8], [24], [25] описываются современные технологии

формирования изображений в 3D дисплеях. Детальное сравнение различных 3D дисплеев можно найти в [29] - [32] и ссылках из этих работ. Известные автостереоскопические методы воспроизведения 3D изображений с двумерным параллаксом и использованием плоской дисплейной панели часто подразделяют на собственно многокурсные методы [6], [33] - [37] и т.н. интегральные методы [38] - [47]. Считается, что в дисплеях первого типа формирование изображения выполняется по отдельным дискретным ракурсам (параллаксам) [6], а в второго – как интегральное воспроизведение светового поля в целом [7]. Несмотря на такое классификационное различие, структура изображения в плоскости изображения обоих типов одинакова [48], и поэтому в диссертации мы будем называть многокурсные изображения того и другого типа просто многокурсными, не уделяя отдельного внимания различию между ними. В таких изображениях ячейка – это базовая единица многокурсного изображения, образованная пикселями разных параллакс [48], [49].

В некоторых работах построены модели отдельных частей дисплея. Полезные геометрические соотношения приводятся в работах [50] - [52], а модель [53] описывает систему записи с использованием шестиугольного массива микролинз. В работе [53] получено много формул, в том числе для диспарантности (disparity) и передаточной функции (spread function). Работа [54] предоставляет модель на основе однородной матрицы, описывающей диапазон воспринимаемой дальности, в том числе ограничение из-за стереопсиса (fusion). Авторы Штерн и Джавиди [47] классифицируют интегральные дисплеи и анализируют идеальный дисплей. Работа [51] основана на модели линзы. В работах [55], [56] проанализированы такие характеристики как угол наблюдения, дальность и угловое разрешение многокурсных дисплеев. Однако цельная картина формирования

многоакурсных изображений в различных дисплеях пока отсутствует.

Визуальное качество – важная характеристика изображения [57], которая зависит от многих факторов [58]. Качество двумерных дисплеев принято оценивать такими характеристиками как яркость и контраст изображения, диапазон воспроизводимых цветов и цветовая насыщенность, размер и количество пикселей и др.

При рассмотрении качества, встает проблема его сравнительной и численной оценки. Вторая часть этой проблемы и рассматривается в диссертации применительно к многоакурсным изображениям. Помимо вышеупомянутых традиционных факторов, многоакурсные изображения отличаются по воспринимаемой глубине изображения, величине и форме области наилучшего восприятия и т.п. Не последнее место в характеристике 3D дисплеев занимают т.н. перекрёстные помехи, показывающие относительный уровень фонового или паразитного изображения из стороннего визуального канала, который не требуется для восприятия предусмотренного (идеального) изображения в данном положении наблюдателя. В последнее время снижению уровня перекрёстных помех уделяется повышенное внимание [59] - [61].

Ранее другими авторами были предложены несколько способов оценки качества 3D изображений, основанных на разных принципах, в том числе трёхмерный контраст [62] и интервал диспарантности [63]. В этом отношении небезынтересно, что трёхмерная сцена содержит больше воспринимаемых деталей, чем соответствующая плоская [64], т.е. возникает эффективно «добавленное» визуальное содержание. Полезен также подход [65], где даётся явная оценка стереоскопического качества.

В целом анализ научной литературы показал, что в настоящее время методам математического моделирования многоакурсных дисплеев

уделяется недостаточно глубокое внимание, также как и чисто аналитическим методам, часто позволяющим найти общее решение задачи, применение которого, как правило, шире, чем результаты моделирования конкретной практической ситуации. Практически ни одна из упомянутых выше работ по многокурсным дисплеям не связана с систематическим описанием многокурсных дисплеев в целом. Большинство работ фокусируются на конкретных устройствах и их отдельных особенностях, и посвящены анализу, а часто и техническому усовершенствованию по сравнению с ближайшими аналогами. Полной же картины, представляющей многокурсный дисплей на математическом языке, насколько автору было известно [66], не существует. Таким образом, в настоящее время не построено модели, охватывающей круг устройств указанного вида.

Следовательно, для обеспечения развития методов формирования требовалось создать аналитическую модель многокурсного дисплея, позволяющую описывать геометрические характеристики автостереоскопических дисплеев, такие как расположение дискретных плоскостей, размер области наблюдения и др. с целью синтеза и анализа изображения. Это также даёт возможность рассмотреть визуальное качество изображения.

В частности, для автостереоскопических дисплеев типичной конструкции перекрёстные помехи можно оценить геометрически на основании предложенной модели. В диссертации предлагается это выполнять аналитически на основании того, «что видит наблюдатель в любом месте перед дисплеем» [62], [64]. С нашей точки зрения геометрия является одним из наиболее важных фундаментальных факторов, влияния которого на качество не обойти. Поэтому мы рассматриваем вопрос оценки качества с геометрической точки зрения, первоначально изложенной в [67]. Тем более,

что с учётом большего числа параметров, воздействующих на качество, оценка может только ухудшиться, но не может стать лучше геометрической. Т.о. наша оценка даёт верхнюю границу, т.е. максимальное в принципе достижимое визуальное качество в данных условиях.

Наша оценка [68], [69] выполнена в однородных проективных координатах в пространстве модели. Функция качества имеет постоянное значение вдоль дискретных плоскостей в областях и между ними. Определены характерные точки функции, и найдены значения функции качества в этих точках. Это позволяет оценивать поведение функции качества для увеличенных значений числа параллаксов и ячеек изображения, т.е. для большего числа точечных источников и большей области наблюдения.

Минимизация и компьютерное моделирование эффекта муара. Эффект муара – оптическое явление, возникающее при наложении нескольких прозрачных или частично прозрачных повторяющихся структур (решёток) [70] - [72], которое «происходит, когда повторяющиеся структуры (такие как экраны и решётки) накладываются друг на друга или рассматриваются напросвет» [70]. Наложение приводит к оптическому взаимодействию, что создаёт т.н. комбинационные частоты. При этом низкие комбинационные частоты визуально проявляются как относительно широкие (тёмные и светлые) полосы [71] на фоне исходных слоёв, которые зачастую сами практически незаметны.

Эффект муара может проявиться в самых разнообразных условиях. На предмет эффекта муара были исследованы не только в электронно-лучевые трубки [73], жидкокристаллические (ЖК) [74] и 3D дисплеи [75], но и органические светоизлучающие диоды (LED) [76] и изображения в рентгеновских лучах [77]. Муаровские полосы могут быть сильнее заметны в 3D дисплеях с двумерным параллаксом [78].

С прикладной точки зрения проявления эффекта муара могут быть и позитивными и негативными.

Примером первого рода является использование этого эффекта для бесконтактных измерений [71], в муаровской интерферометрии [72], [79], [80] и в муаровской топографии [81] для точных линейных измерений. Кроме множества классических применений, таких как муаровский увеличитель [82], определённо интересными применениями этого эффекта являются выравнивание в нанотехнологии [83], фоторефрактивные решётки [84], защита документов [85] и измерение размера пикселя [86]. Полезное использование эффекта муара включает также нанолитографию [87], где этот эффект помогает улучшить точность выравнивания. Интересное применение синусоидальных решёток для измерений представлено в [88].

В изображениях или в устройствах, предназначенных для рассматривания изображений, появление муара особенно заметно. Поэтому негативным примером могут служить напечатанные или сканированные изображения, особенно цифровые, а также экранные дисплеи, в том числе телевизионные.

В печатной промышленности муаровские узоры, которые получаются при репродуцировании полутонных оригиналов, считаются нежелательными [89]. Узоры вызваны оптическим взаимодействием между элементами структуры полутонного экрана и точками или линиями, имеющимися в воспроизводимом изображении, а при многоцветном воспроизведении в полиграфии могут произойти из-за неправильно установленного угла между экранами или неточной юстировки оттисков [90].

В визуальных дисплеях эффект муара создает лишнее смысла визуальное изображение полос, и поэтому рассматривается как нежелательный эффект (визуальный шум). Муаровские полосы могут

появиться в непредусмотренной части экрана и тем самым воздействовать на качество изображения отрицательно. Эффект муара практически неизбежен в структуре, состоящей из нескольких регулярных или почти регулярных слоёв [70].

Хотя эффект муара имеет место во многих ситуациях при наложении двух и более регулярных или почти регулярных прозрачных слоёв, но по сравнению с остальными случаями, многоракурсные дисплеи более подвержены этому эффекту в силу своей типичной структуры, включающей, как правило два параллельных слоя [91], таких как ЖК панель, параллаксный барьер, микролинзовый растр, лентикулярная пластина, массив светодиодов, структурированный поляризатор (patterned retarder) [8], [9], [92], [93] и др. Слои эти разделены на повторяющиеся элементы (пиксели, микролинзы, и др.) и эффективно могут быть представлены периодическими решётками. В таких решётках, наложенных друг на друга, как правило, наблюдается эффект муара [70].

Цифровой экран как правило состоит из большого количества одинаковых пикселей и представляет собой первый конструктивный слой дисплея; второй слой (напр., лентикулярная пластина или барьер [9]) также является регулярной структурой. Более того, для автостереоскопических дисплеев, как правило, имеет место соотношение кратности размеров ячеек в этих слоях, когда отношение периодов обычно является целым числом или числом, близким к целому (как например, относятся период пикселей и период лентикулярных линз в интегральных изображениях). Этим удовлетворяется одно из условий возникновения эффекта муара, который поэтому является не случайным гостем в автостереоскопических дисплеях. В этом случае муаровские узоры появляются очень легко, тем самым существенно снижая визуальное качество.

Чем выше регулярность слоёв, тем ярче и даже красочнее могут выглядеть муаровские узоры, часто воспроизводящие увеличенную структуру предыдущего слоя (ЖК панель) [70], [82]. 3D дисплеи, основанные на ЖК панелях, подвержены эффекту муара больше, чем электронно-лучевые или напечатанные изображения, потому что регулярность пикселей ЖК устройств намного выше, чем в других упомянутых случаях. Такая структура – плодородная почва для появления эффекта муара, и в дисплее такой конструкции муар практически неизбежен [94]. Сказанное приводит нас к тому, что снижение (минимизация) этого негативного эффекта является одним из важных вопросов при улучшении качества визуальных дисплеев, в том числе 3D автостереоскопических.

Оптические слои в дисплеях должны быть точно отъюстированы относительно друг друга и достичь этого практически бывает не очень просто. Тем не менее даже в случае идеального выравнивания, муаровские полосы являются нестабильными [70], и небольшое смещение наблюдателя относительно экрана может привести к значительному изменению визуального эффекта.

Помимо этого, эффект муара особенно заметен в 3D дисплеях ещё и потому, что в реальном устройстве слои находятся на конечном, а не на нулевом расстоянии, как в общепринятой «классической» модели этого эффекта [70]. Кроме того, как уже указывалось, наблюдатель автостереоскопического дисплея имеет возможность свободно перемещаться перед экраном. В этом случае из-за ненулевого зазора между слоями проявление эффекта муара меняется в зависимости от положения наблюдателя перед экраном.

Вышеуказанные факторы способствуют расширению зоны видимости эффекта муара и, соответственно, к значительному снижению визуального

качества при изменяющемся положении наблюдателя. Пример 3D дисплея, подверженного эффекту муара показан на рис. 1, где наклонные цветные муаровские полосы отмечены стрелками.



Рис. 1 — Нежелательный эффект муара в дисплее

У наблюдателя автостереоскопических изображений имеется некоторая свобода перемещения без потери естественного стереоскопического восприятия. При этом визуальное изображение, построенное, например, в соответствии с методом формирования (см. гл. 2) меняется соответственно содержанию визуальной сцены. Однако муаровские узоры не ведут себя подобным или хотя бы сходным образом, поскольку они не имеют отношения к изображению, воспроизводимому на экране. Видимый эффект муара зависит от структуры слоёв и их относительного расположения, от положения наблюдателя и др., причём эти факторы, за исключением отдельных редких случаев, никак не связаны с полезным изображением. Такое несоответствие отрицательно воздействует на восприятие, поскольку в результате наблюдатель одновременно видит две независимые наложенные картины: полезное изображение и муаровские узоры, которые ведут себя произвольно

по отношению друг к другу. В 3D дисплеях муар может быть особенно раздражителен, а в худшем случае может даже нарушить стереоскопическое восприятие. Значит, особенности эффекта муара в дисплеях должны быть исследованы, чтобы можно было предпринять специальные меры для его снижения (минимизации), а в лучшем случае – устранения.

В последнее время появились работы об эффекте муара в 3D дисплеях. В частности, подробное обсуждение проводится в [95]. Ранее различными авторами были рассмотрены разнообразные специальные случаи муара; найдены решения в частных случаях и решены некоторые относящиеся проблемы [70]. Другими авторами выполнялось, в частности, моделирование эффекта муара и соответствующие вычисления для различных дисплеев с учётом следующих факторов: угол пересечения и угловая скорость [94], ориентация пленки, улучшающей яркость [76], конечный зазор между слоями [95], и форма теневого муара [72], где важно положение наблюдателя.

Соответственно сказанному, можно констатировать, что одной из нерешенных полностью проблем автостереоскопических дисплеев являются муаровские узоры, возникающие в большой мере из-за регулярности используемых оптических элементов. Компьютерное моделирование даёт оценку визуального эффекта для различных сочетаний параметров и поэтому полезно для минимизации эффекта муара.

Устранение или по крайней мере ослабление (минимизация) эффекта муара является важным пунктом улучшения визуального качества дисплеев, особенно 3D автостереоскопических многокурсных и интегральных [7], [8], [96], которые обычно построены из двух слоев периодической структуры (одномерных или двумерных решёток) [47]. Минимизация муара важна для напечатанных изображений [97], сканированных изображений [90], и дисплейных устройств [98]. Некоторые сингулярные состояния (близкие к

углам 30° и 15°) используются в цветных печатных полутоновых изображениях [90]. Важность снижения эффекта муара в автостереоскопических 3D дисплеях была отмечена автором в 2003 г., по-видимому, впервые в литературе, см. [99], [100].

Эффектом муара можно управлять путём изменения параметров (напр., угла или зазора между слоями). Для автостереоскопических дисплеев существенна стабильность минимизации, т.е. например, требуется найти такой угол, в окрестности которого эффект муара будет минимизирован (в некотором диапазоне изменения параметров). При правильно выбранных параметрах можно сделать этот эффект практически незаметным для наблюдателя.

В простых случаях геометрия муаровских узоров может быть непосредственно рассчитана аналитически, и для слоёв, находящихся в одной плоскости и состоящих из параллельных линий, период муаровских полос определяется по известной формуле [70],

$$T_M = \frac{T}{2 \left| \sin \frac{\alpha}{2} \right|} \quad (1)$$

представляющей, по-существу, покомпонентное векторное сложение в спектральной области. При использовании этой формулы следует иметь в виду, что она применима только в области углов от 0 до 90° .

В дисплеях эффект муара рассматривается как негативный и поэтому должен устраняться [95]. Для преодоления этого нежелательного в визуальных дисплеях эффекта разными авторами были предложены различные методы, в том числе использование фильтров [101] и наклонных линзовых растров [102], нахождение оптимального угла в общем случае [103] и конкретно для цветных дисплеев [95], наклонное расположение пикселей

[104] при фиксированном угле установки лентикулярной линзы, и оптимальный угол [95], [103] для разных расположений оптических элементов. С этой точки зрения управление муаром (минимизация) является важным в производстве печатной продукции [89], 3D дисплеях [95], осветительных приборах [105] и многих других областях, связанных с визуальными дисплеями. Небезынтересен способ минимизации [106], основанный на пространственном разделении полезного изображения и изображения муаровских полос.

Прямой (геометрический) подход к изучению муара проведен в [72], [85], [107] и других работах. Имеются работы посвященные методам ослабления эффекта муара, в основном на базе общего подхода [70]. Устранение муаровских узоров является важным пунктом в высококачественном воспроизведении 3D изображений [95], [108], [109]. Среди упомянутых работ привлекательно простым является способ [107].

В более сложных ситуациях формулы, полученные на основе прямого подхода, становятся неприменимы. Тогда требуется рассмотреть более общий случай: эффект муара в спектральной области. Спектральный подход был рассмотрен в [70], [83], [95], [110] - [112] и других работах. Там найдены различные характеристики муаровских спектров. Преобразование Фурье делает спектральные методы весьма мощными, но необходимость его постоянного использования придает им некоторую тяжеловесность. Недавно и мы переключились на более общий спектральный подход [113]; наш подход основан на спектральных траекториях. В нашем случае преимуществом является отсутствие необходимости явного использования преобразования Фурье даже при минимизации в спектральной области.

Спектральные траектории в общем смысле были применены в самых различных областях исследований, таких как аэрокосмические измерения

[114], кластеризация траекторий движения [115], распознавание речи [116]. Однако применительно к эффекту муара были рассмотрены только траектории точек [70], причём в пространственной области, а не в спектральной. Использование спектральных траектории муаровских волн для минимизации эффекта муара было предложено автором сравнительно недавно [113].

Кроме того, ненулевое расстояние между слоями существенно для измерительных методов, таких как, напр., определение формы при помощи теневого муара [72], контурные линии в муаровской топографии [117] и другие. Для этих целей изучаются муаровские узоры, образующиеся от источника света и решётки, лежащих в разных плоскостях [118]; здесь вероятно будет уместно упомянуть о том, что геометрия таких измерений очень похожа на геометрию многоактурных дисплеев, новые методы формирования которых представлены в гл. 2. Муаровские узоры, полученные от одинаковых решёток с ненулевым зазором, проанализированы в [119], [120].

При таком подходе визуальные проявления муара при изменении параметров могут быть оценены по изменению положения спектральных линий в комплексной плоскости, т.е. по траекториям. Следовательно, требовалось исследовать характерные черты эффекта муара в многоактурных дисплеях и на этой основе разработать теорию и средства его минимизации как способа устойчивого улучшения визуального качества изображения. В соответствии с этим, автор диссертации выполнил исследование эффекта муара в 3D автостереоскопических дисплеях [121], предложил спектральные траектории муаровских волн в комплексной плоскости [122], дал теоретические основы графической минимизации с учётом эффекта конечного расстояния [123], выполнил компьютерное

моделирование эффекта муара и провел комплексное его исследование [124], в основном применительно к автостереоскопическим изображениям.

Тенденции. Аппаратура и методы формирования 3D изображений постоянно совершенствуются. В последние годы наблюдается заметный рост числа публикаций по 3D дисплеям. Представляется, что в целом тенденция развития направлена на приближение к реальному трёхмерному изображению. В этом отношении характерно, что наблюдается заметный рост числа публикаций по повышению эффективности вычислений в цифровой голографии [125], хотя до систем реального времени здесь ещё не близкий путь. Своеобразным компромиссом нынешнего времени могут служить стереоскопические дисплеи, однако использование обязательных специальных очков часто рассматривается как неудобство для широкого пользователя. Поэтому развитие дисплеев в ближайшее время скорее всего будет идти в направлении автостереоскопических устройств, лишенных этого недостатка.

На рынке уже появляются отдельные дисплеи такого типа, которые, хотя и не предоставляют наблюдателю полный спектр возможностей будущих 3D дисплеев, но уже на данном этапе вполне способны быть конкурентоспособными на рынке 3D дисплеев. Со стороны рынка к новым устройствам требования предъявляются ничуть не ниже, чем к имеющимся (как правило, высококачественным). Это в равной мере относится и к 3D дисплеям, безо всякой скидки на их новизну. Соответствовать таким высоким требованиям можно только путём постоянного повышения визуального качества, что требует дальнейшего поиска новых методов формирования и развития способов повышения визуального качества изображения. В частности, в последнее время снижению уровня перекрёстных помех, как важной характеристике качества, уделяется отдельное внимание.

Кроме того, за последние годы появилось много работ об эффекте муара в дисплеях различных типов. Чтобы получить стабильную минимизацию в автостереоскопических дисплеях, требуется сделать муар визуально невидимым при изменении параметров в некотором диапазоне – в частности независимо от положения наблюдателя, например, в пределах области наблюдения. Поэтому нестабильное сингулярное состояние, хотя в принципе может быть достаточным для двумерных дисплеев, не подходит для трёхмерных. Таким образом, в 3D дисплеях стабильное условие минимизации муара должно обеспечиваться не в точке, а в некоторой области пространства параметров. Удобной техникой для достижения этого являются предложенные автором спектральные траектории в комплексной плоскости.

Вышеуказанные факторы представляют характерные тенденции в развитии автостереоскопических 3D дисплеев и повышения их визуального качества.

Основные преимущества и недостатки. Приведем положительные характеристики объёмного дисплея волнометрического типа. В таком дисплее никакие специальные оптические приспособления для наблюдения (как например, шлемы или поляризационные очки) не требуются. Для наблюдения объёмного изображения строго вертикальное положение головы наблюдателя также не необходимо; не требуется и датчик положения наблюдателя. Отсутствует конфликт между конвергенцией и аккомодацией. Полностью отсутствуют проективные искажения при рассматривании изображения с разных направлений.

Однако, в силу наличия механической развертки по одной координате, рабочий объём существенно ограничен и в системе с параллельным перемещением экрана составляет несколько сотен см³; ограничена и максимальная частота регенерации изображения. Здесь следует упомянуть,

что в последнее время возникла тенденция значительного повышения частоты регенерации изображения в ЖК дисплеях до нескольких сотен Гц. С этой точки зрения, частота регенерации 25 Гц макета объёмного дисплея (см. гл. 1) может выглядеть явно недостаточной.

Как альтернатива, автостереоскопические дисплеи в принципе способны предоставить наблюдателю стереоскопическое изображение на экране достаточно большого размера при высокой частоте регенерации, однако наличие перекрёстных помех и сравнительно узкая область наблюдения делают их использование пока ограниченным.

Кроме того, до сих пор не имеется достаточно детальных аналитических исследований эффекта муара, позволивших бы обеспечить минимизацию в диапазоне параметров, а не только около некоторой точки в пространстве параметров. Этот вопрос рассмотрен в главе 3. К настоящему времени для минимизации эффекта муара автором разработаны два подхода: первый – прямой аналитический [103], второй – наглядный геометрический [126]. В общих чертах эти подходы упоминаются и другими авторами, но автор диссертации рассматривает эти вопросы как с общей точки зрения, так и детально, а также даёт конкретные способы практической минимизации эффекта муара в широком диапазоне параметров.

Актуальность работы/темы. Для совершенствования методов формирования 3D изображений в настоящее время актуальным является проведение комплексного исследования факторов, эффектов и элементов, оказывающих влияние на качество изображения. А именно, для автостереоскопических изображений требуется подробное рассмотрение смешивания ракурсов и построение способов изменения положения и расширения зоны наблюдения. Для этого требуется рассмотрение структуры области наблюдения, смешивания ракурсов, системы оценки качества и

разработки новых способов формирования и обработки многоракурсных изображений, что и было предпринято в настоящей работе. Типичная конструкция автостереоскопических дисплеев позволяет оценивать перекрёстные помехи геометрически. Для систем реального времени актуальным представляется способы синтеза и анализа многоракурсных изображений на базе образцов вокселей.

На момент начала работ постановка вопроса с комбинированной разверткой в объёмном дисплее волюметрического типа была пионерской, и поэтому требовала проработки полного комплекса вопросов с учётом акустооптических и электромеханических ограничений по времени, требований к линейности сканирования трёхмерного пространства, а также требований к способу поточечного формирования линий в трёхмерном пространстве и наблюдения изображения с учётом свойств зрительного восприятия человека.

Эффект муара является негативным фактором, значительно снижающим визуальное качество в многоракурсных изображениях. Это делает надежное гарантированное устранение эффекта муара важным этапом разработки и тестирования 3D автостереоскопических дисплеев. На основе предложенной теории минимизации автором предложены два подхода к минимизации эффекта муара, недопустимого в высококачественных дисплеях, выполнено компьютерное моделирование этого эффекта, а также комплексное его исследование в многоракурсных изображениях.

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 для современных методов формирования 3D изображений актуальным является 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.

Вопросы согласования факторов восприятия рассмотрены в [10]. Улучшение отдельных параметров дисплеев, оказывающих влияние на визуальное качество, произведено в [6], [7]. Эффект муара рассмотрен известными авторами И. Амидрором [70] и К. Паторским [71], а использование слежения за положением наблюдателя описано, напр., в [7]. При этом установлена более слабая зависимость между аккомодацией и конвергенцией, чем это принято считать; различные аспекты методов формирования трёхмерных изображений усовершенствованы; в отдельных ситуациях эффект муара снижен, однако единый практический подход к минимизации этого эффекта отсутствует; а слежение сопряжено с дополнительной математической обработкой.

Итак, соответственно сказанному выше, можно констатировать, что **целью данной работы** является разработка методов формирования, оценки и улучшения визуального качества автостереоскопических изображений.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) Разработать метод формирования трёхмерных изображений в ограниченном объёме 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 многокурсных изображений и предложить эффективные методы формирования и обработки таких изображений.

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.

К **новым результатам**, полученным в ходе исследования, можно отнести следующие:

♦ Экспериментально подтверждена возможность визуализации в реальном времени объёмных изображений волюметрического типа каркасных объектов информативностью до $8 \cdot 10^4$ точек на кадр с использованием комбинированного акустооптического и электромеханического 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 и на их основе предложены новые методы формирования и обработки многокурсных изображений, 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. Предложен принцип построения 3D изображений на основе эффекта муара.

Теоретическая значимость полученных результатов состоит в том, что синтез и анализ многокурсных изображений на основе образцов вокселей 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, и позволяет проводить минимизацию по четырем конструкционным параметрам (угол, соотношение сторон и размеров).

С точки зрения **практической значимости** важно то, что оценка параметров автостереоскопического изображения (например, наличие переходных помех и визуальное качество) может быть выполнена на стадии проектирования дисплея. Предложенный метод формирования многокурсных изображений с использованием образцов вокселей 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 объёмных изображений волюметрического типа 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 объемных 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 [127]. 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.

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы 15 статьях в ведущих 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 с индексом SCI-E. Отдельные статьи автора цитируются в литературе многократно. Например, Статья в журнале Optical Engineering [92] цитирована 75 раз, статья в Applied Optics [128] – 59 раз, а статьи в Journal of Display Technology [129] и [103] – 31 и 14 раз. Индекс цитирования автора (h-index) составляет 6 или 7 (по системам Google Scholar и Scopus, соответственно). Часть результатов опубликована в монографиях издательств Springer [130] и Офсет (г. Новосибирск) [127].

Материалы работ по теме диссертации докладывались на 12 международных конференциях: 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 – 2013 гг. в Корее и на Международных семинарах по дисплеям (IDW) в 2011 – 2012 гг. в Японии. Среди указанных имеются приглашенные (invited) и программные (keynote) доклады.

На защиту выносятся следующие положения:

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

2) Образцы выявленных структурных элементов (вокселей на дискретных расстояниях) позволяют осуществить формирование и обработку многокурсных изображений (в частности, восстановление положения трёхмерных 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 изображения на новом физическом принципе – эффекте муара.

Глава 1. Компьютерные программы для вычислительного эксперимента с использованием объёмного дисплея и метод последовательного формирования 3D изображения

Вычислительный эксперимент в трёхмерном пространстве основан на использовании нового метода формирования 3D изображения. Основная идея этого метода заключается в том, что объёмное изображение формируется высокоскоростной отклоняющей системой на сканирующем полупрозрачном экране в пределах ограниченной области физического пространства. Предложенный метод предполагает вывод 3D изображения по слоям путём последовательной выдачи на подвижный светорассеивающий экран всех сечений отображаемого объекта, причём изображение каждого сечения формируется при помощи высокоскоростной комбинированной акустооптической электромеханической системы отклонения лазерного пучка и его визуализации в трёхмерном пространстве. Программы для вычислительного эксперимента включают программу отображения, компилятор графических файлов, драйвер и визуальный интерпретатор. Такой проблемно-ориентированный комплекс предоставляет возможность моделирования разнообразных трёхмерных структур с возможностью наблюдения их в пространстве несколькими наблюдателями одновременно.

В 1995-97 гг. в ИАиЭ СО РАН (г. Новосибирск) проводились работы по созданию устройств трёхмерного отображения в реальном времени. Сложность разработки заключалась не только в надлежащем использовании имеющихся в то время компонентов, но и в согласовании характеристик визуального восприятия человека с техническими характеристиками отдельных узлов объёмного дисплея, а также в обеспечении совместной работы этих узлов. Отсутствие метода формирования изображения и программной среды для тестирования и управления делало задачу ещё более

трудной. Требовалось экспериментальное подтверждение, также необходимы были средства для вычислительного эксперимента с использованием объёмного дисплея волюметрического типа.

Коллективом лаборатории 1-3 (с участием автора) был разработан и изготовлен макет 3D дисплея с подвижным рассеивающим экраном [12], [15]. Формирование 3D изображений в объёме производится под управлением компьютерной системы, выполняющей генерацию изображения и выдачу координат отображаемых точек на систему отклонения синхронно с положением подвижного экрана в реальном времени. Автором разработана система управления формированием 3D изображений в реальном времени, включающая расширяемый алгоритм формирования пространственных линий. Такой макет дисплея вместе с компьютерными программами для вычислительного эксперимента (в том числе компилятор и интерпретатор) предоставляет наблюдателю 3D изображения с реальной трёхмерностью в пределах ограниченного объёма пространства (области изображений).

Приведем краткое описание аппаратуры этого макета; блок-схема которого показана на рис. 2. Рабочий объём представляет собой пространственную область $10 \times 10 \times 5 \text{ см}^3$, в которой необходимо было строить изображения реальной трёхмерности в реальном времени. Высокоскоростная отклоняющая система выполняет комбинированное пространственное сканирование: по двум координатам осуществлялась акустооптическая развертка, а по третьей – механическая. Оптическая система включает в себя источник монохроматического излучения (лазер) и четыре акустооптических дефлектора (по два последовательных каскада на каждую координату). Такая система вместе с блоком управления обеспечивает точное позиционирование луча в 256×256 точках экрана.

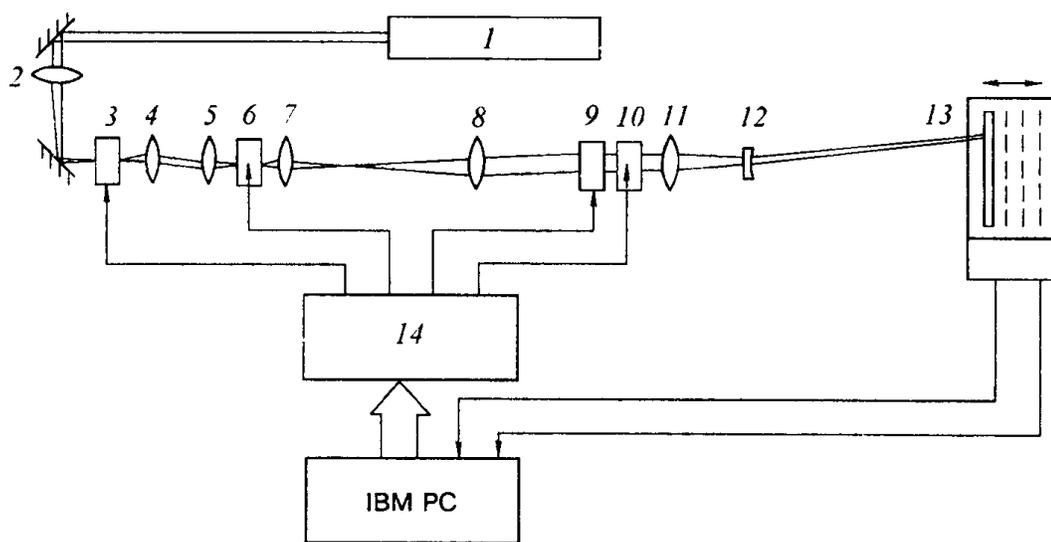


Рис. 2 — Блок-схема объёмного дисплея волуиметрического типа. Показаны: 1 He-Ne лазер ($\lambda = 0,63$ мкм), отклоняющая система 3- 12, электромеханический светорассеивающий экран 13, управляющий компьютер IBM PC.

Благодаря инерции человеческого глаза, изображение каждой из коротких (0,5 мкс) импульсных вспышек лазера мощностью 55 мВт продолжает некоторое время (по крайней мере, до следующего кадра) восприниматься визуально в том месте, где находился сканирующий экран в соответствующее время. Такое свойство глаза позволяет провести размещение видимых точек в пределах области изображения. Продолжительность интервала, в течение которого позиция луча не изменяется, составляет 0,32 мкс. За такое время экран смещается на 40 мкм, чем практически можно пренебречь по сравнению со смещением за время между синхроимпульсами (которое составляет 125 мкс).

Существенным признаком объёмного дисплея волуиметрического типа

является отсутствие визуального перекрытия (блокирования) дальних точек ближними, т.е. эффективная прозрачность изображения. Происходит это потому, что все точки в каждой плоскости выводятся и воспринимаются независимо. Затем, когда производится переход к следующей плоскости, предыдущие точки физически исчезают, но их образы сохраняются в памяти наблюдателя. При этом точки, находящиеся на одной линии визирования, запоминаются независимо, что воспринимается как прозрачность.

По площади имеется 256×256 дискретных положений луча, обеспечиваемых акустооптическим дефлектором, а по дальности – 313 положений экрана, отсчитываемых датчиком поворота оси механизма. В первой версии системы управления и тестирования используются все положения экрана (крайние из которых могут быть более насыщены информацией), а во второй – 150 положений в пределах относительно линейного участка механической развертки вблизи центра области изображения (отклонение от линейности доходит до 10% только на краях этого участка), а оставшееся время используется для геометрических преобразований.

При перемещении подвижного экрана блок синхронизации вырабатывает 2 серии импульсов: импульсы синхронизации всей сцены (кадра) и импульсы синхронизации отдельных сечений (плоскостей). Первую синхросерию составляют импульсы с частотой, равной частоте вращения маховика, вторую – 625 импульсов за период его вращения; эти синхроимпульсы соответствуют фиксированным положениям оси вращения механизма механической развертки.

Плоский подвижный экран изготовлен из органического стекла со светорассеивающим покрытием без послесвечения. Размеры экрана 15×10 см², толщина 0,2 см. Экран совершает возвратно-поступательное движение в

пределах $\pm 2,5$ см с частотой до 25 Гц. Эффективно используемая площадь экрана 10×10 см² обеспечивает механическое сканирование объёма пространства $10 \times 10 \times 5$ см³. Этот объём мы называем областью изображения.

В пределах плоскости отклонение по углу равномерное и при максимальном угле $1/16$ отклонение в плоскости экрана XU тоже может считаться равномерным с точностью до 10^{-3} , тогда как механическое движение рассеивающего экрана по продольной координате синусоидальное, т.е. явно неравномерное. Автором выбран режим работы с ограниченным диапазоном по оси Z в пределах относительно равномерного инкремента. В центре области изображения, где плотность плоскостей максимальна, время на плоскость составляет $1/25$ сек / $256 = 125$ мкс при частоте кадров 25 Гц, что означает 488 точек в плоскости при 0,32 мкс на точку. Кроме линейного отсчета всех координат, такой режим имеет то преимущество, что в крайних плоскостях, находящихся за пределами линейного диапазона, экран находится дольше. При этом возможна более детальная прорисовка изображения в этих выделенных плоскостях ближнего и дальнего плана, что позволяет сделать их намного более насыщенными даже при сильных временных ограничениях; кроме того, такое распределение времени предоставляет возможность выполнения геометрических преобразований.

Описанная аппаратура позволяет поточечно формировать растр 64К точек в плоскости экрана. Если при этом область движения экрана разбить на 300 элементарных перемещений, то количество адресуемых положений в трёхмерном пространстве составляет $64К \times 300 = 20М$. Аппаратный видеобуфер отсутствует. Для практического программирования также существенно, что интерфейсным модулем прерывания не вырабатываются.

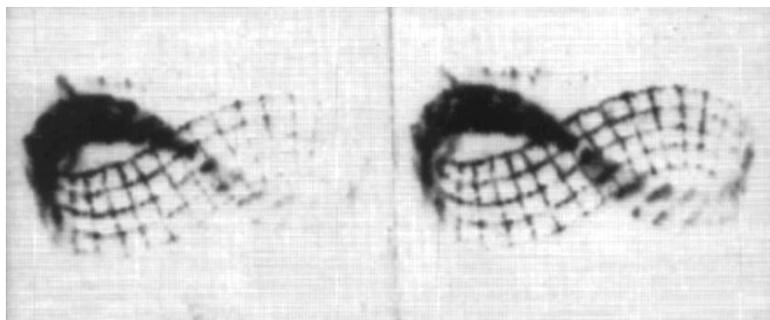


Рис. 3 — Фотография объёмного изображения в объёмном дисплее
волюметрического типа (негатив)

Сформированные указанным методом пространственные объекты отчётливо воспринимаются наблюдателями в трёх измерениях. Полноценное 3Dое 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 тангенциального или близкого к нему. Для объёмного изображения волюметрического типа характерна эффективная прозрачность. Конфликт между конвергенцией и аккомодацией отсутствует. Количество наблюдателей неограничено. Изображения монохроматические (длина волны 0,63 мкм) с двумя уровнями яркости. Черно-белая фотография объёмного изображения показана на рис. 3 как стереопара.

1.1. Общая характеристика метода послойного формирования

Формирование трёхмерного объекта начинается с его геометрического описания, на основе которого строится поточечное представление объекта, которое далее передается программному драйверу и отображается в физическом объёме в реальном времени. При отсутствии аппаратных возможностей управления яркостью единственным средством, обеспечивающим отчётливое визуальное восприятие дальности точек в таком дисплее, является их физическое расположение в разных плоскостях. С

механическим сканированием по одной из координат это требует последовательного синхронного синтеза изображения, в силу чего метод предполагает послойное формирование 3D изображения посредством последовательной выдачи на подвижный светорассеивающий экран сечений воспроизводимого объекта, причём в каждой плоскости изображение формируется при помощи высокоскоростного двухкоординатного отклонения лазерного пучка.

Программные средства управления, тестирования, а также программы вычислительного эксперимента, в том числе для обработки, формирования и отображения трёхмерного контекста, являются аппаратно-зависимыми, поскольку они основаны на явном использовании особенностей аппаратуры.

Для представления объектов в трёхмерном пространстве требуются увеличенные по сравнению с двумерным случаем объёмы памяти, и поэтому существенным становится тщательное распределение используемой компьютерной памяти. Эта проблема решена компактным описанием отображаемых объектов, а также использованием расширенной памяти. В реализованных программах для вычислительного эксперимента координаты выводимых точек хранятся в программном буфере в оперативной или в расширенной (EMS) памяти.

Одно из основных требований к системе управления – обеспечение вывода графической информации в реальном времени. Вывод всех точек, относящихся к текущей плоскости, должен завершиться до прихода следующего синхроимпульса, означающего переход к очередной плоскости; аналогично – при поступлении импульса синхронизации кадра. Эти условия должны выполняться безусловно, иначе вывод точек в последующих плоскостях (кадрах) может быть нарушен.

Соответственно сказанному выше, проведен анализ способов описания

трёхмерных объектов и, с учётом требований реального времени, для данного макета выбрано «каркасное» (wireframe) представление, когда воспроизводятся не грани объекта, а его рёбра. Такое представление оказалось достаточно эффективным; оно значительно облегчает временные условия и позволяет сократить время вывода изображения, потому что для представления сечения даже простой односвязной трёхмерной поверхности требуется по крайней мере одна непрерывная линия в каждой плоскости, в то время как для соответствующего трёхмерного каркаса необходимо вывести лишь точки рёбер, которые находятся в текущей плоскости сечения. Другими словами, критическим параметром является уже не длина линий сечения, которую можно приблизительно оценить как средний периметр объекта, а количество рёбер на плоскость сечения, что значительно меньше.

Практическая реализация системы управления дисплеем и программ для вычислительного эксперимента в операционной системе DOS 6.22 позволяет воспроизводить в трёхмерном физическом пространстве разнообразные сконструированные геометрические объекты (в том числе комбинированные сцены, состоящие из нескольких объектов). Статические формы воспроизводятся программой-интерпретатором. Имеется возможность объединить несколько изображений, представляющих, к примеру, фазы движения, в последовательность кадров. Состав одной из демонстрационных программ приведен в конце главы.

Комплекс программ для вычислительного эксперимента и систему управления формированием 3D изображений для вычислительного эксперимента можно разделить на два функциональных уровня: базовый уровень ввода/вывода и уровень прикладной программы. Реализованы две версии комплекса: 3DDISPL – с предварительной обработкой графической информации и непосредственным доступом прикладной программы к

устройству и COSMOS – с обработкой информации в реальном времени и доступом прикладной программы к устройству через программный драйвер, который обеспечивает взаимодействие операционной системы с аппаратурой. Первая версия оформлена как компилятор простого языка описания трёхмерных сцен (и потому требует предварительной компиляции графических файлов), вторая – как интерпретатор файлов DXF, работающий полностью в реальном времени, что позволяет выполнять не только формирование, но и интерактивные геометрические преобразования изображения по командам оператора. Во второй версии влияние фактора аппаратной зависимости снижено за счёт перераспределения зависимых/независимых функций между программой-интерпретатором и драйвером.

Важным элементом метода формирования изображения является способ поточечного рисования рёбер каркасных объектов, т.е. прямых линий в трёхмерном пространстве. В описываемых программах для вычислительного эксперимента это выполнялось при помощи изначально двумерного алгоритма Брезенхама [131], модифицированного автором для трёх измерений, см. Приложение А. Такой модифицированный алгоритм может быть легко расширен на случай N измерений, что не свойственно независимым предыдущему [132] и последующим [133], [134] трёхмерными аналогами алгоритма Брезенхама, рассчитанными именно на три измерения.

1.2. Тестовые средства управления 3DDISPL (1995 г).

Системы координат. В версии 3DDISPL используются следующие системы координат. Первая – система пространственных координат реального трёхмерного мира (world system), описывающая положение объекта в области изображений, вторая – целочисленная система координат элементов

объёмного изображения (вокселей), и третья – специфическая система координат устройства отображения. Каждая компонента программных средств управления и тестирования рассчитана на работу в своей координатной системе, а преобразования в программных средствах обработки трёхмерного контекста и управления выполняются в направлении от первой системы к третьей. При этом преобладающая часть обработки выполняется в мировой системе, а затем следует серия преобразований в разных системах координат и др.

Правая (научная) левосторонняя мировая система координат. Начало координат находится в центре пространственной сцены. Координаты – числа с плавающей точкой (X, Y, Z) такие, что $|X| \leq 1$, а $|Y| \leq 2$, $|Z| \leq 2$.

Локальная дискретная система координат вокселей (зависимая от устройства). Координаты – неотрицательные целые числа (Sheet, Row, Col), которые можно упорядочить как в книге страницы, строки и позиции в строке (колонки). При этом страницы (Sheet) могут принимать значения от 0 до 149, а строки (Row) и колонки (Col) – от 0 до 255. В соответствии с принятой в описываемой системе управления моделью книги, начало координат находится в левой верхней точке ближайшей к наблюдателю страницы.

Система координат аппаратуры: плоскость, ячейка и позиция в ячейке (Plane, Domain, Index), см. рис. 4.

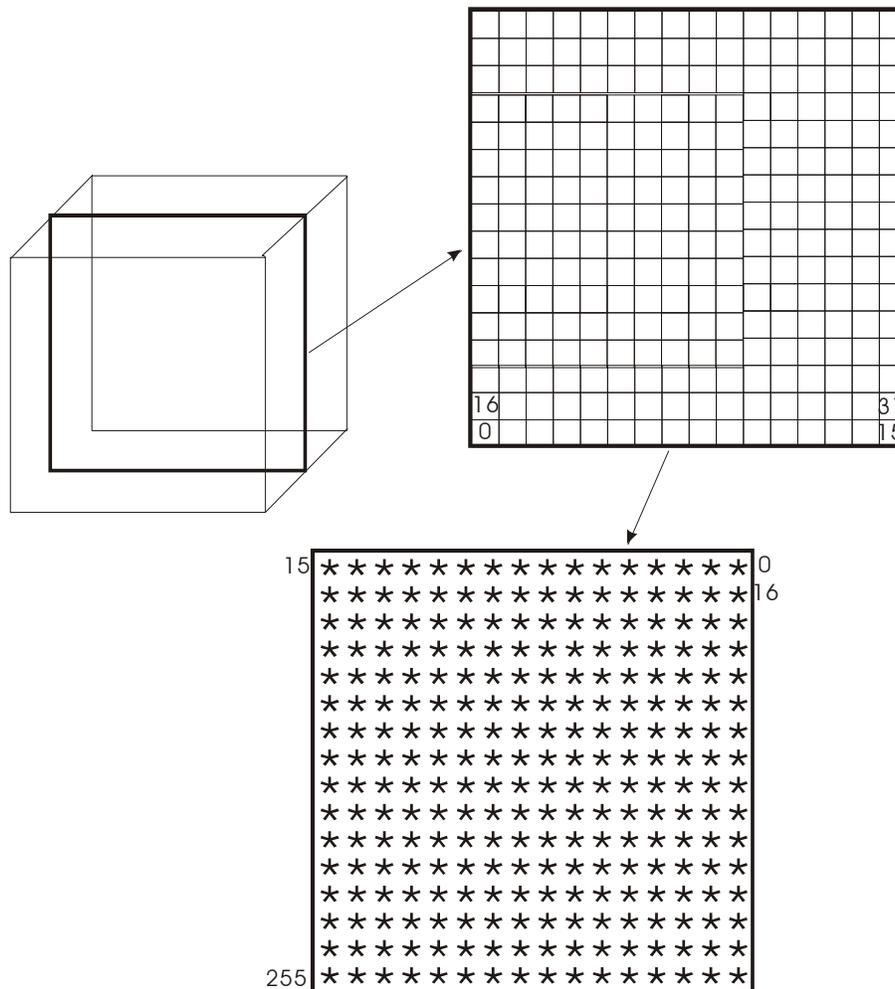


Рис. 4 — Аппаратные координаты

Язык описания трёхмерных сцен. Для описания сцен был создан простой входной язык 3DD, который позволяет описывать неподвижные сцены, построенные из примитивов. Графические примитивы 3DD включают следующие: переключение системы координат «W/D/V» (Toggle the World/Discrete/ voxel system), точка «P x y z» или «P Sheet Row Col» соответственно текущей системе координат, линия «L x1 y1 z1 x2 y2 z2», правильный многоугольник «G v1 v2 x y z s» (v1 v2 – количество вершин, s – размер), окружность «C x y z s» в двух вариантах (поточечно типа Брезенхама

или как многоугольник с числом сторон, зависящим от радиуса в пикселях), правильный многогранник «N v s x y z», строка текста «N x y z text», произвольный текст «T x y z f» (f – имя файла, в данном случае txt), растровое изображение, «подвешенное» под плоской ломаной линией «B f x1 y1 z1 ... xN yN zN» (f – в данном случае psx), растровое изображение на нижней поверхности области изображений «4 f x1 y1 z1 x2 y2 z2», сфера с растровой текстурой «S f s x y z», поверхность, заданная таблично на сетке MxN в файле «3f», снежинка «b t x y z s» (t – один из 6 использованных типов снежинки). Пример файла 3DD приведен в Приложении Б.

Схема описания и формирования объектов. В версии 3DDISPL формирование изображения выполняется за три ступени. Первая ступень – предварительная. Здесь содержимое файла 3DD, содержащего описание трёхмерной сцены, интерпретируется по примитивам (точка, линия, окружность, многоугольник, многогранник, текст) в мировой системе координат, преобразуется в целочисленные воксели и записывается в дисковый буфер вокселей (файл 3D1). Буфер содержит отсортированные по странице, строке и колонке воксели без повторений. Вторая ступень переводит координаты в систему устройства (файл 3D2). Третья – исполнительная; воксели выводятся на экран из файла 3D2.

Для рисования линий используется трёхмерный аналог алгоритма Брезенхама [131], а правильные многогранники изображаются в удобном для математического описания положении «на ребре» (но очевидно неудобном для размещения физических тел на поверхности), причём два из многогранников описаны с использованием т.н. «золотой пропорции»

$$\varphi = \frac{\sqrt{5} + 1}{2}.$$

1.3. Программные средства для вычислительного эксперимента COSMOS (1996 г.)

Краткое функциональное описание. Программные средства второй версии (для вычислительного эксперимента) включают драйвер MS DOS и прикладные программы. Соответственно этому, структура системы подразделяется на два уровня. Схема взаимодействия между уровнями показана на рис. 5.

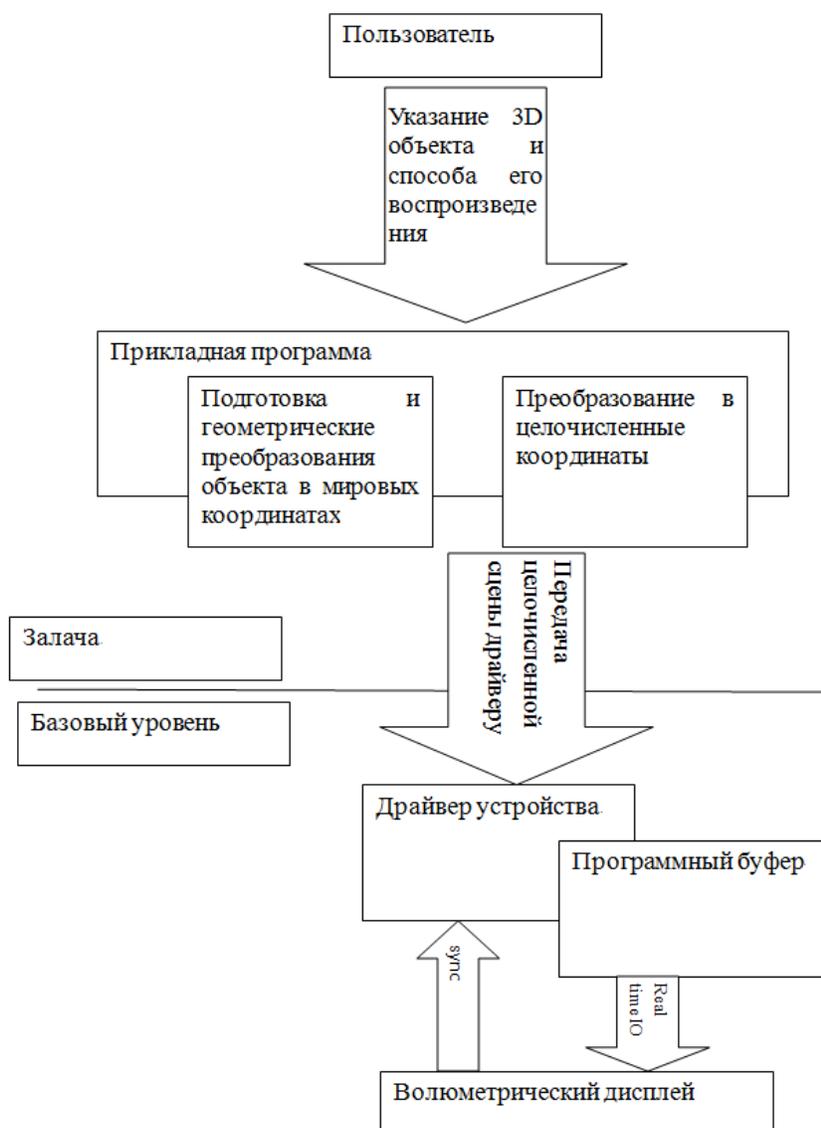


Рис. 5 — Взаимодействие между уровнями системы вычислительного

эксперимента

На базовом уровне ввода/вывода выполняются все функции, зависящие от особенностей аппаратуры. Этот уровень реализован драйвером. Драйвер устройства DOS (специализированная программа для вывода графической информации) обеспечивает постоянную регенерацию изображения в реальном времени из программного буфера в соответствии с сигналами внешней аппаратной синхронизации.

Второй уровень – это прикладная программа (задача). Она не связана с особенностями аппаратуры, и поэтому имеет больше возможностей для преобразования данных. В качестве такой программы реализован VI – визуальный интерпретатор пространственных форм из графического файла (рабочий формат данных – DXF), т.е., "плеер" для последовательного воспроизведения нескольких файлов друг за другом. Источником графических файлов для воспроизведения может быть любая программа, которая способна создавать векторные пространственные объекты и/или экспортировать их в формате DXF; это, в частности, Auto CAD, 3D Studio, Corel Draw и другие. Программа VI интерактивно выполняет геометрические преобразования 3D изображения по командам оператора.

Системы координат. В версии COSMOS размер трёхмерных объектов произволен; при воспроизведении они нормализуются так, чтобы целиком помещаться в области изображений. Используются системы координат, сходные с версией 3DDISPL: мировая (с плавающей точкой без ограничения на диапазон координат), локальная для геометрических преобразований (координаты с плавающей точкой нормализованные в диапазон 1,5/3,5), целочисленная система книги в диапазоне 150/255 для построения рёбер, клеточные координаты для передачи драйверу.

Линии строятся в целочисленной системе книги. Сортировка по листам не выполняется, её обеспечивает алгоритм построения линий. Перед загрузкой координаты книги преобразуются в клеточные координаты. Для ускорения последующего физического вывода в процессе загрузки выполняется сортировка по клеткам в пределах листа.

Интерфейс драйвера. Посредством функций чтения и записи драйвер предоставляет операционной системе возможность создания файловой системы в расширенной памяти, что даёт пользователю дополнительную возможность хранить там произвольные файлы. Это обеспечивается универсальными функциями DOS (INT 21h): DOS Fn 3f (чтение), DOS Fn 40 (запись).

Основной способ взаимодействия задачи с драйвером при отображении трёхмерных сцен – через подмножество функций управления вводом-выводом устройства IOCTL DOS Fn 44, а именно функцию управления записью IOCTL Out DOS Fn 44 Sub 3 – загрузка каркаса в буфер драйвера.

При выполнении некоторых действий, напр., при воспроизведении кадра, предусмотрено обращение к внутренней функции драйвера как к функции программного прерывания. Такая организация программы позволяет выполнять быструю внутреннюю функцию напрямую без прохождения диспетчеризации операционной системы, что важно для обеспечения работы в реальном времени. Функция прерывания не имеет входных параметров и не возвращает результата. Две функции воспроизведения DrawSheet (локальная) и DrawFrame реализованы на языке ассемблера. Структуры данных драйвера и упомянутые функции на языке ассемблера приведены в Приложениях В и Г.

Пример прикладной программы. Программа VI (visual interpreter) – визуальный интерпретатор графических файлов DXF. Программа разбирает содержимое файла в соответствии с регулярным синтаксисом секций файла

DXF путём нисходящего синтаксического анализа по лексемам и извлекает из геометрических примитивов необходимую для воспроизведения каркаса информацию. В описываемой версии из числа примитивов DXF используются линия, многоугольник (замкнутый, плоский), сетка и многогранник. По завершении синтаксического разбора получается описание трёхмерной сцены DxfScene в мировых координатах.

На основе этого создаётся каркасное описание сцены (WireFrame), которое далее локализуется (LocalWireFrame) и дискретизируется (IntWireFrame), т.е. делается доступным для драйвера физического устройства. После этого дискретный каркас передается драйверу COSMO96A посредством функции управления вводом-выводом (ioctl), а драйвер выводит изображение в объёмном дисплее.

По командам оператора локальный каркас может быть преобразован в интерактивном режиме и вновь передан драйверу для воспроизведения после дискретизации. Геометрические преобразования (масштабирование, повороты вокруг осей, трансляция параллельно осям) выполняются по нажатию кнопок на клавиатуре.

1.4. Качество изображения и возможное применение объёмного дисплея в медицине

Если отбросить чрезвычайно важный фактор реальной объёмности изображения, то качество изображения данного объёмного дисплея волюметрического типа приблизительно соответствует видеомонитору VGA или типичному печатающему устройству Epson: 2,5 – 3 точки/мм (64 - 75 точек на дюйм, dpi). Изображение монохроматическое с двумя уровнями яркости.

Кроме традиционных (3D дисплей как таковой), одним из

нестандартных применений является тренировка визуального аппарата человека, см. [135]. В этом качестве дисплей может быть использован не только для диагностики, но и для устранения некоторых дефектов зрения. Подобные устройства были предложены ранее [136] - [138], однако они не обеспечивают такой же точности измерений.

Под остротой стереоскопического (глубинного) зрения понимают наименьшую разницу в дальности двух объектов (обычно в миллиметрах), при которой ещё получают правильные ответы пациента относительно взаимного расположения двух объектов (по дальности). Остроту стереоскопического (глубинного) зрения часто выражают углом диспарации $\alpha = \beta_1 - \beta_2$, см. рис. 6.

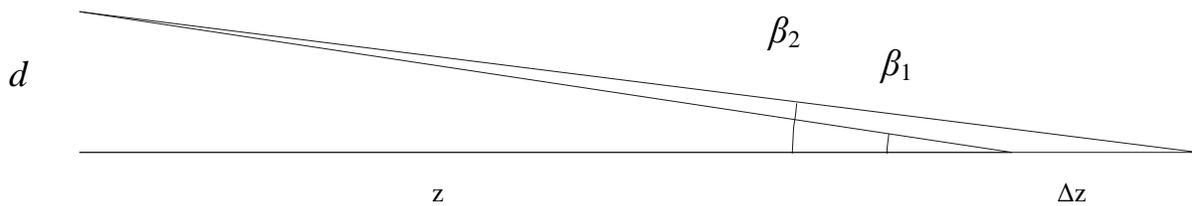


Рис. 6 — Определение угла диспарации

Вместо малых углов можно использовать их тангенсы. Тогда приближённое выражение для угла диспарации выглядит так

$$\tan \alpha = \tan \beta_1 - \tan \beta_2 = \frac{d}{z} - \frac{d}{z + \Delta z} = \frac{d(z + \Delta z) - dz}{z(z + \Delta z)} = \frac{d\Delta z}{z(z + \Delta z)} \quad (2)$$

где d – межзрачковое расстояние, Δz – измеренная разница глубинных координат, z – расстояние, с которого производилось измерение. При малом угле диспарации

$$\tan \alpha \approx \frac{d\Delta z}{z^2} \quad (3)$$

Для определения остроты стереоскопического зрения при помощи

лазерного объёмного дисплея, объёмные изображения формируются в виде разнесённых в пространстве тестовых изображений с опорными точками и подвижными маркерами. Пациенту предъявляют тестовые изображения, а он с помощью средства позиционирования управляет перемещением подвижного маркера до визуального совмещения с опорной точкой. В соответствии с формулой (3) координаты маркера и опорной точки дают остроту зрения стереоскопического зрительного анализатора по разнице координат и расстоянию от глаз пациента до опорной точки.

Благодаря высокой скорости формирования изображений маркера и опорной точки, их протяженность, определяемая сдвигом экрана по глубине пространства, достаточно мала. В предлагаемом способе координаты маркера и опорной точки определяются с точностью, которая в 4 раза превосходит точность известных во время выполнения работы способов. В результате повышается точность определения порога стереоскопического зрения.

1.5. Эксперименты

Для обеспечения вычислительного эксперимента метод последовательного формирования изображений был реализован и протестирован с использованием высокоскоростной акусто-электромеханической системы трёхмерного отклонения и визуализации лазерного пучка света в пространстве области изображений.

Выполнены эксперименты по формированию тестовых изображений с реальной трёхмерностью: правильных многогранников, упрощённых изображений машин, архитектурных сооружений и других 3D объектов совместно с проф. П.Е. Твердохлебом, к.т.н. А.В. Трубецким и к.т.н. Ю.А. Щепёткиным. В экспериментах обеспечено формирование тестовых объёмных изображений с информационной ёмкостью до $8 \cdot 10^4$ точек на кадр

(т.е., до 1 – 2 тысяч рёбер в каркасном представлении при средней длине ребра около 60 вокселей). Эта величина обусловлена соотношением частот регенерации изображения и переключения углов (эффективно, точек изображения) в отклоняющей системе. Общий угол обзора изображения (см. рис. 3) достигает 150° . При этом разрешающая способность в одном сечении 256×256 точек; число сечений по глубине пространства 150; физический размер отображаемого пространства $10 \times 10 \times 5$ см³; частота регенерации объёмного изображения 25 Гц. Опытным путём проиллюстрирована возможность формирования устойчивых для глаза человека 3D изображений в реальном времени.

Среди тестовых объектов имеются следующие: пунктирные и осевые линии, эллипс и астроида, цилиндр и конус (построенные из линий, исходящих по образующей). С использованием разработанных автором программных средств управления и тестирования в экспериментах были сформированы изображения таких векторных объектов как модели автомобиля, архитектурных сооружений и городской застройки. Кроме того, воспроизведены такие трёхмерные объекты как различные поверхности, пространственный узел, лист Мёбиуса, различные многогранники, в том числе правильные, звёздчатые и в сочетаниях, звёзды Эшера, функции Гаусса и Бесселя, функции комплексной переменной, трёхмерная проекция четырёхмерного гиперкуба, дом из фильма Тарковского, кирпичная кладка и др. На этой базе была подготовлена демонстрационная программа со сменным дальним планом и вращающимися случайными снежинками.

Несколько примеров пространственных изображений трёхмерных объектов, воспроизведённых при помощи второй версии COSMOS, показаны на рис. 7.

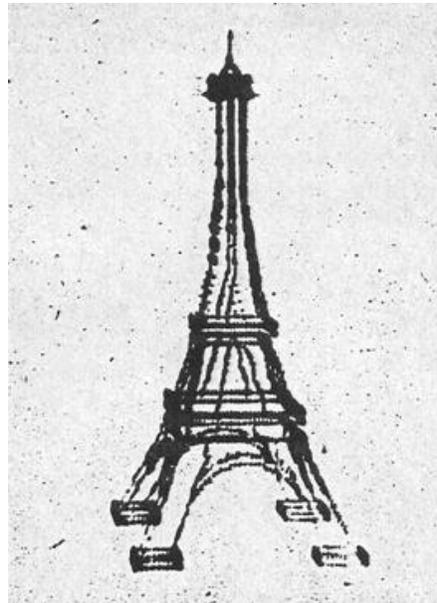
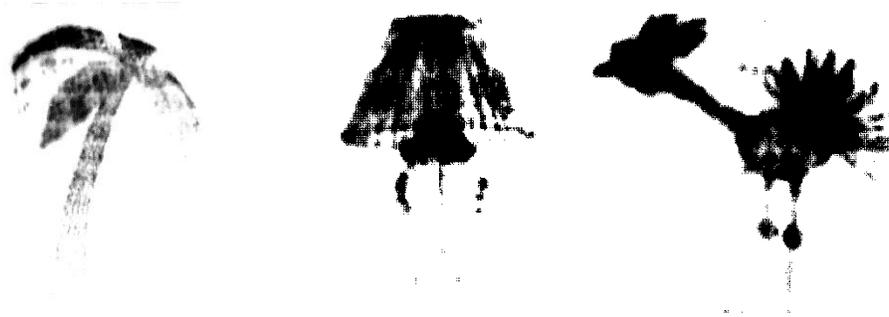


Рис. 7 — Фотографии некоторых воспроизведённых объектов (негативное изображение): пальма, настольная лампа, страус, эйфелева башня

В заключение главы приведем состав демонстрационной программы 3DDISPL.

Векторные объекты. 1) Пять правильных многогранников в трёхмерном пространстве, расположенных по дуге от дальнего левого верхнего угла области изображения до её ближнего левого нижнего угла. 2) Автомобиль 80-х годов ВАЗ-2108 в масштабе около 1:40. 3) Известное архитектурное сооружение Эйфелева башня. Изображена в масштабе около 1:3000. 4) Город. Общий вид сверху.

Поверхности. 1) Сетчатая поверхность. Двумерное нормальное

распределение Гаусса. Начало координат находится в центре области изображения, ось Z направлена вверх, а оси X и Y лежат в горизонтальной плоскости. В декартовых координатах $f(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2))$, в цилиндрических $f(r) = \exp(-r^2)$. 2) Штрихованные поверхности. Несколько т.н. линейчатых поверхностей изображены штриховкой: круговой конус, круговой цилиндр, поверхность, имеющая в сечениях эллипс $x^2 + y^2 = a^2$ и астроида $x^{2/3} + y^{2/3} = a^{2/3}$. 3) Растровая текстура глобуса. Карта мира в цилиндрической квадратной проекции спроецирована на поверхность сферы. "И все таки она вертится ..." (слова, приписываемые Г. Галилею). Масштаб статического изображения глобуса – около 1: 250 000 000, вращающегося – около 1: 330 000 000.

Аквариум. Случайная пространственная мозаика из нескольких правильных многогранников, движущихся со случайной скоростью в случайном направлении. Демонстрируется общий объём области, в которой воспроизводятся изображения. Угол отражения от невидимых стенок аквариума не всегда равен углу падения (т.е. иногда отражение происходит неупруго), что сделано намеренно, с целью придать изображению приятное разнообразие.

Выводы к главе 1

В объёмном дисплее волюметрического типа хорошо воспринимается форма объектов, относительное расположение объектов и их частей в пространстве, рельефность поверхности. Следует отметить, что каркас, будучи воспроизведённым в реальном физическом объёме, даёт наблюдателю достаточно хорошее, отчётливое впечатление о пространственной структуре

воспроизводимого объекта. Ясно и наглядно отображаются каркасные изображения и сложные поверхности. На первый взгляд одноцветное изображение кажется непривычным, но полноценное бинокулярное восприятие создаёт у наблюдателя законченное представление о сложной пространственной форме.

С разработанными средствами управления лазерный объёмный дисплей волнометрического типа вместе с программами для вычислительного эксперимента можно использовать, например, при автоматическом проектировании. Важным элементом программной системы формирования 3D изображений является способ поточечной генерации 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 разнообразных тестовых изображений с реальной трёхмерностью 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. Опытным путём проиллюстрирована возможность формирования 3D изображений в реальном времени, устойчивых для глаза человека.

Сформированные пространственные объекты отчётливо воспринимаются наблюдателями в трёх измерениях. 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 тангенциального. У объёмного изображения волнометрического типа отсутствует конфликт между конвергенцией и аккомодацией. Количество наблюдателей неограничено. Изображения монохроматические (длина волны 0,63 мкм) с двумя уровнями яркости.

Качество объёмного изображения волнометрического типа 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 дисплея на принципе объёмного изображения волнометрического типа является тренировка визуального аппарата человека.

В целом система управления дисплеем 1995 - 96 гг. позволяет во-первых, создавать описание сцены на некотором простом входном языке, причём объекты могут состоять из точек, линий, произвольным образом закрашенных поверхностей, текстовой маркировки; транслировать это описание в промежуточный код, доступный для обработки другими программами; транслировать несколько файлов промежуточного кода в код устройства и воспроизводить оттранслированные трёхмерные сцены в пространственном окне; во вторых, воспроизводить простые трёхмерные сцены из файла DXF при помощи интерпретатора (без предварительной трансляции); интерактивно выполнять геометрические преобразования интерпретированных сцен.

Глава 2. Формирование, обработка и оценка качества многокурсных изображений

Дисплей является оптическим устройством, преобразующим управляющие сигналы в оптическое излучение, которое несёт информационную нагрузку. Создание дисплея – это по-существу прямая оптическая задача о получении определённого распределении светового излучения в области наблюдения при заданных свойствах экрана. Для решения этой задачи необходимо иметь математическое описание пространства вокруг дисплея. Такое описание, в частности, позволяет находить основные геометрические характеристики дисплея и изображения, как напр., расположение дискретных плоскостей, положение и размер области наблюдения, и др. Наше описание построено на принципах геометрической оптики с использованием проективных преобразований.

Далее, можно найти выявить в плоскости изображения характерные структурные элементы многокурсных изображений и на их основе теоретически построить базовые образцы вокселей как элементарных трёхмерных объектов, расположенных на дискретных расстояниях, а затем с их использованием построить новые способы формирования многокурсных изображений и использовать их на практике для синтеза и анализа. В частности, это продемонстрировано в диссертации при формировании изображений по плоскостям и при восстановлении расположения объектов по их многокурсным изображениям; также дана система оценки уровня перекрёстных помех по количеству смешанных ракурсов, что важно для улучшения визуального качества многокурсных изображений.

Предложенное аналитическое описание охватывает разнообразие автостереоскопических дисплеев, поскольку основано на их типичной

структуре. При этом интегральные и многоракурсные дисплеи не различаются как в [26], поскольку оба эти типа подчиняются общим условиям [48]; поэтому в диссертации мы будем называть их многоракурсными. Базовое описание дано в [139], [140] как модель, в которой дисплей состоит из двух слоёв: информационный экран и массив оптических эквивалентов точечных источников. Описание [140] дано в проективной форме, однако в [139] ещё были использованы декартовы координаты.

Сначала мы рассматривали лишь модельные точечные источники [141] но затем перешли к более общему описанию с использованием эквивалентов. Эквивалентность отверстий и линз объясняется в [51]. Поэтому в диссертации используется термин «точечные источники», даже если в устройстве фактически использованы линзы или отверстия, расположенные в виде массива (lenslet array, pinhole array). До нашей работы [142] структура области наблюдателя была проанализирована только в целочисленном случае [143] - [147]. Хотя аналитическое описание сформулировано сравнительно недавно, некоторые важные свойства многоракурсных изображений были использованы автором совместно с к.т.н. Е.Ф. Пенем при построении многоракурсных стереограмм [148] в 1999 г.

Аналитическое описание, предложенное автором, не имеет аналогов. Формирование и обработка (т.е. синтез и анализ) многоракурсных изображений производятся с использованием построенных автором образцов вокселей способами, ранее не известными в мировой литературе.

Образцы вокселей используются для генерации многоракурсных изображений по геометрическому описанию сцены, а также для восстановления расположения объектов в трёхмерном пространстве по их многоракурсным изображениям. Аналитическое описание позволяет находить такие характеристики, как расположение дискретных плоскостей и

положение (размер) области наблюдения, а кроме того оценить уровень перекрёстных помех по количеству смешанных ракурсов, что важно для улучшения визуального качества.

2.1. Геометрические характеристики многоракурсных изображений

Многоракурсные автостереоскопические (3D) дисплеи, как правило, состоят из двух слоёв: первый слой – это экран, который несёт изображение, а второй – оптический элемент, определённым образом направляющий изображения ракурсов наблюдателю (в частности, под разными углами) [144]. Иногда этот элемент, в силу его важности, называют специальным термином «оптика формирования зоны наблюдения» (viewing zone forming optics, VZFO) [149].

Существенным для представленных методов формирования и обработки является наличие физических элементов экрана и массива точечных источников света, а в пространстве вокруг дисплея – областей наблюдения и изображения, см. рис. 8. Область наблюдения находится перед экраном дисплея, а область изображения охватывает экран и массив точечных источников. Из первой области наблюдатель видит наименее искажённое изображение, причём с её диагонали изображение воспринимается без визуальных перекрёстных помех, а во второй области находятся видимые изображения объектов.

Соответственно сказанному, описание многоракурсного дисплея опирается на две параллельные плоскости (массива источников света и информационного экрана) и включает две области, см. рис. 8. Обе области в сечении имеют форму дельтоида, т.е. симметричного четырёхугольника, составленного из равнобедренных треугольников.

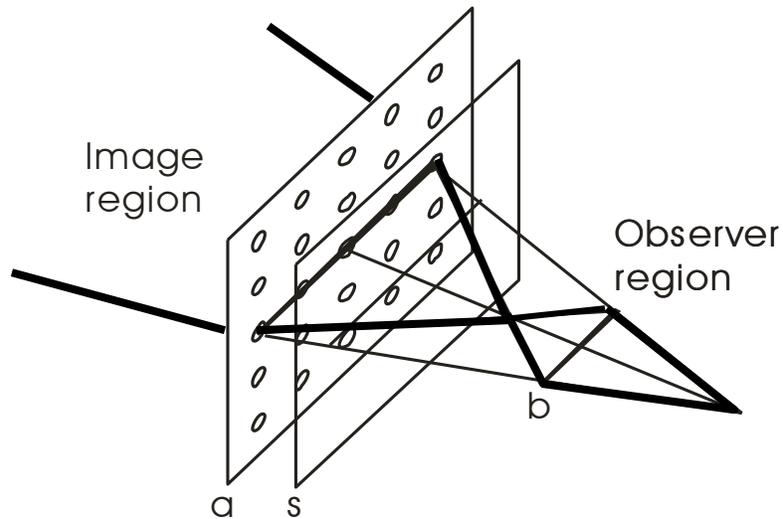


Рис. 8 — Основные объекты геометрического описания дисплея

Массив точечных источников a представляет собой массив (матрицу) точечных источников света или их оптических эквивалентов. Источники в матрице расположены периодически и излучают свет в пределах некоторого конуса углов. Матрица источников может быть создана непосредственно, например, из миниатюрных светоизлучающих элементов [150], [151]; а кроме того, точечные источники могут быть реализованы и другими способами, например, из параллельного пучка света при помощи линзового растра. Вместо источников света, формально рассматриваемых в модели, на практике равным образом могут быть использованы и их оптические эквиваленты в рамках геометрической оптики, например, линзы; тогда изображение в плоскости экрана может быть скорректировано посредством локальной инверсии координат. Во всех этих случаях существенной является ячеистая структура изображения, в которой одна ячейка соответствует одному точечному источнику массива или элементарной линзе линзового растра.

Экран s несёт полезное многоракурсное изображение. Форма экрана геометрически подобна форме массива источников. Экран может быть

прозрачным или светоизлучающим.

При использовании в 3D автостереоскопическом дисплее, экран логически разбит на ячейки [152] так, что на каждую ячейку приходится один источник света. Ячейка – это часть экрана, поставленная в соответствие точечному источнику, см. рис. 9. Явной физической границы между ячейками может не существовать, поскольку это – логические, а не физические структуры.

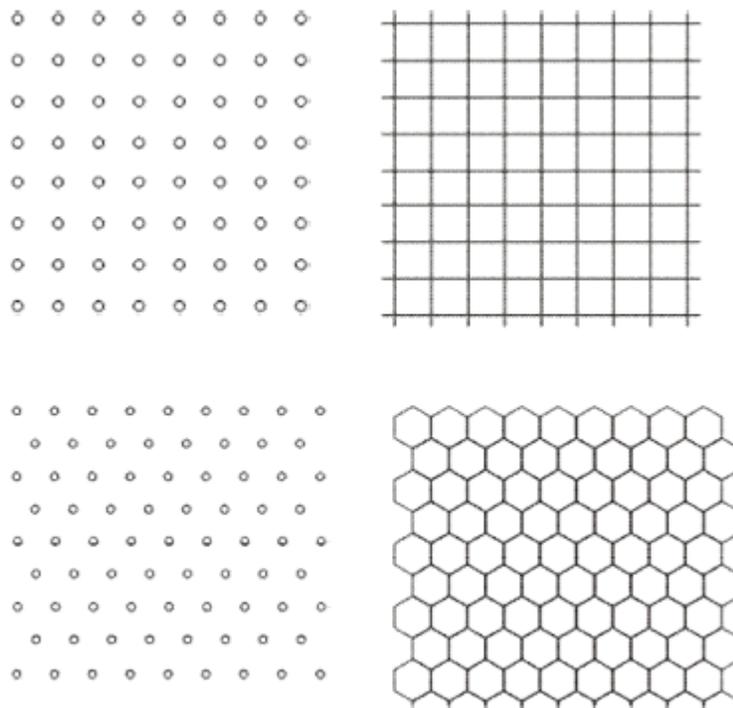


Рис. 9 — Массивы точечных источников (слева) и соответствующие им структуры ячеек экрана (справа)

В случае цифрового экрана число формируемых и отображаемых ракурсов (параллакс) равно числу пикселей в ячейке изображения [153]. В многоракурсных дисплеях количество пикселей в ячейке обычно не превосходит нескольких десятков, тогда как количество источников света может достигать нескольких сотен. Важным поэтому является получение характеристик многоракурсного изображения для больших значений

вышеуказанных количеств.

Место наилучшего восприятия – положение наблюдателя (база), откуда изображение воспринимается лучше всего, поэтому базу наблюдателя b также иногда называют "наилучшее место" (sweet spot). Перемещение наблюдателя вдоль базы происходит без потери качества изображения, тогда как за пределами базы – со снижением качества.

Соответственная ячейка – это та ячейка, через которую проходит луч от источника света в середину базы b . Тем самым, каждому источнику соответствует одна ячейка экрана.

Областью наблюдения (observer region) называется область пространства перед дисплеем, откуда все без исключения источники света видны через соответственные ячейки. Областью изображения (image region) называется область пространства, в которой располагаются объекты, воспринимаемые наблюдателем, находящимся в зоне наилучшего восприятия. Область изображения включает массив точечных источников a и экран s с прилегающим пространством. Области показаны на рис. 10.

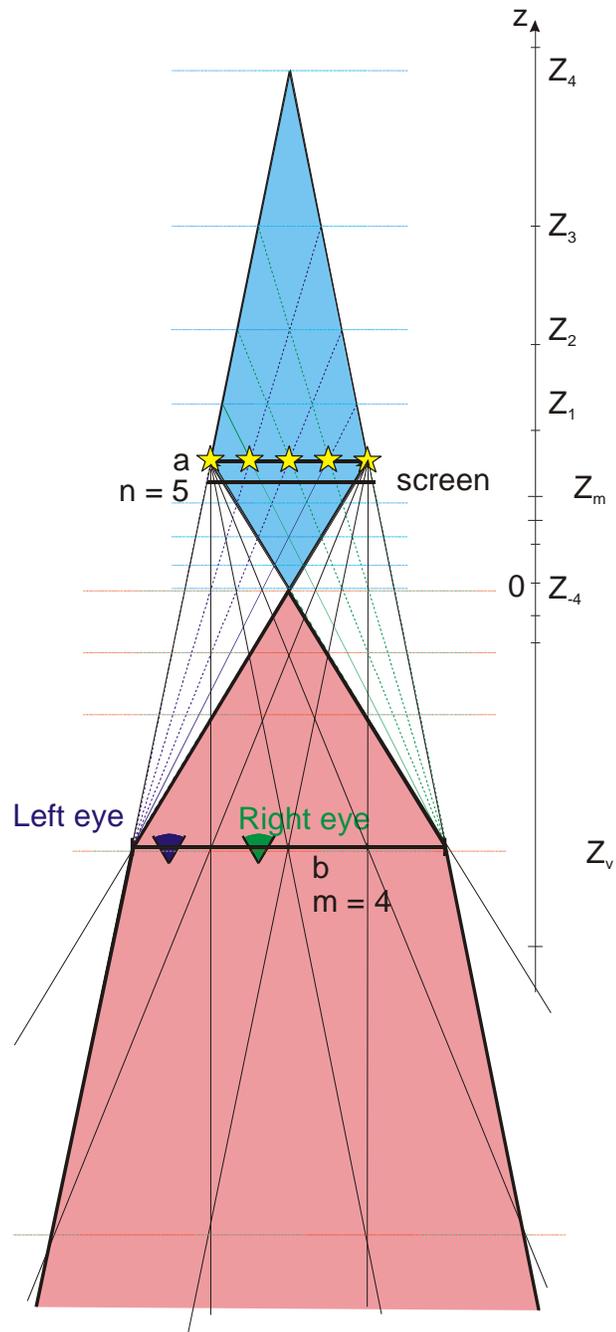


Рис. 10 — Область изображения для 5 источников (сверху), область наблюдения для 4 ракурсов (снизу)

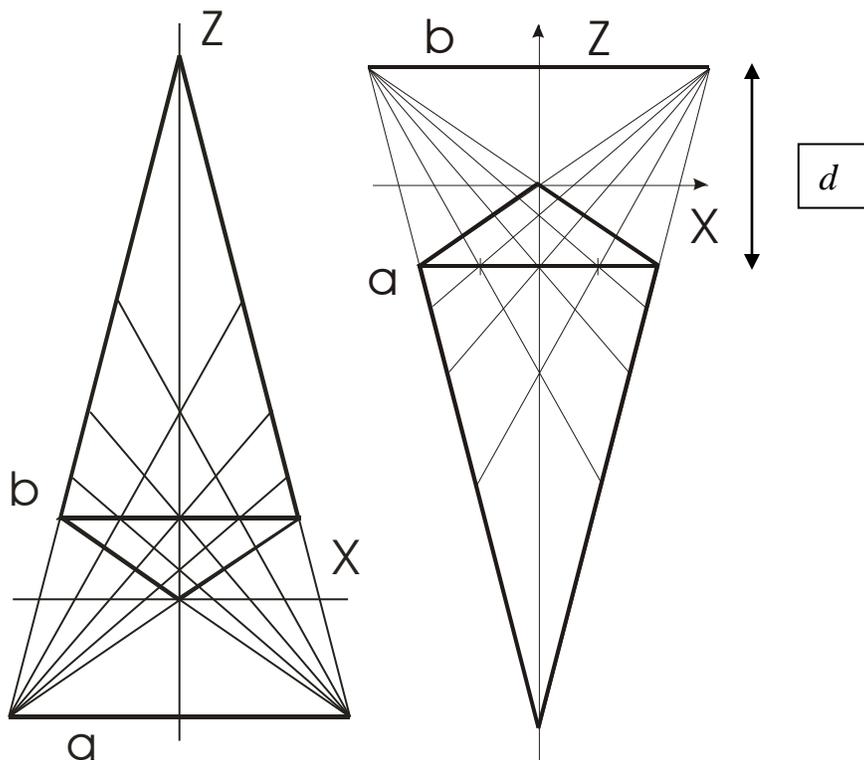
Квазигоризонтальные сечения. В диссертации мы рассматриваем сечения областей изображения и наблюдения, определяемые горизонтальным рядом источников света и положением глаз наблюдателя в зоне наилучшего

восприятия, проходящие, поэтому, через ряд точечных источников. Такие сечения, очевидно, могут оказаться не в точности горизонтальными, но наверняка являются близкими к ним; это свойство сечений превосходно проиллюстрировано в [52]. Поэтому более точно будет назвать такие сечения почти горизонтальными или квазигоризонтальными.

Сходящаяся/расходящаяся геометрия. Отношение горизонтального размера массива источников к ширине базы наблюдателя определяет характеристику геометрии многокурсного дисплейного устройства

$$c = b / a \quad (4)$$

где a – ширина массива точечных источников света, b – ширина области наблюдения. Из двух областей только одна может быть конечной, поэтому другая – бесконечна; см. рис. 11, где показаны конечная область изображения ($c > 1$) и конечная область наблюдения ($c < 1$). Это соответствует смыслу константы c , характеризующей геометрию устройства: сходящуюся либо расходящуюся.



(а)

(б)

Рис. 11 — Квазигоризонтальные сечения конечных областей при разных значениях константы c .

Начало координат. Удобным положением начала координат является точка пересечения диагоналей трапеции с основаниями a и b (рис. 11).

Участки. Геометрическая структура области наблюдения [154] показывает, что область наблюдения автостереоскопических 3D дисплеев разделена на множество участков (viewing regions) [92], [155], [156]. В общем случае воспринимаемое наблюдателем изображение составлено из полос изображений разных параллаксов [128]. Однако видимые комбинации ракурсов, образующие воспринимаемое изображение, различаются от участка к участку. Таким образом, база b (диагональ области наблюдения) разбита на n отрезков, часто называемых зонами наблюдения (viewing zone) [157]; здесь n – количество параллаксов (view image), называемых альтернативно ракурсами. При воспроизведении каждый из этих отрезков базы содержит изображение одного ракурса, соответствующее определённому положению и направлению камеры при фотосъемке. Подобно этому, диагональ области изображения разбита на m отрезков ($m = N^* - 1$), где N^* – количество точечных источников.

Лучами, исходящими от источников света к разбитой на отрезки базе наблюдателя (для области изображения) или линиями, идущими от базы к массиву источников (для области наблюдения), площадь областей разделяется на участки. Участки, диагонали которых находятся на оси y , имеют форму дельтоида, а иначе – четырёхугольника произвольной формы. В случае 2 источников света в области изображения имеется n^2 участков, см. рис. 11(а).

Дискретные плоскости. Диагонали участков, параллельные массиву a и базе b , в совокупности образуют набор дискретных плоскостей l_i , где $i = 0, 1, \dots, 2n$ – номер (индекс) дискретной плоскости, см. рис. 12.

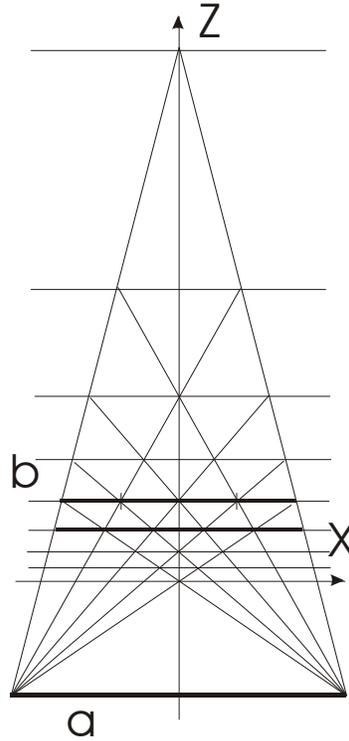


Рис. 12 — Дискретные плоскости в области наблюдения

На основании такого описания аналитическим путем могут быть найдены разнообразные геометрические характеристики многоракурсных изображений, см. напр., [154]. Приведем, в частности, формулы для положения дискретных плоскостей области наблюдения по дальности l , расстояния между соседними дискретными плоскостями Δl , ширины w и высоты h участков в области наблюдения.

$$l_b(i) = \frac{i}{n(c^{-1} + 1) - i} \frac{c^{-1}}{c^{-1} + 1} d \quad (5a)$$

$$\Delta l_b(i) = h_b(i+1) - l_b(i) = \frac{nc^{-1}}{(n(c^{-1} + 1) - i)(n(c^{-1} + 1) - i - 1)} d \quad (5b)$$

$$w_b(i) = \frac{c^{-1}}{n(c^{-1} + 1) - i} b \quad (5B)$$

$$h_b(i) = h_b(i + 1) - l_b(i - 1) = \frac{2nc^{-1}}{(n(c^{-1} + 1) - i)^2 - 1} d \quad (5Г)$$

где i – номер текущей дискретной плоскости ($i = 0, \dots, 2n$), d – расстояние между расчётной зоной наилучшего восприятия и плоскостью точечных источников, индекс b означает область наблюдения, а индекс a (см. ниже) будет обозначать область изображения.

В зависимости от конкретной аппаратной реализации точечных источников и экрана, пропускающий экран может быть расположен в любом месте между массивом и базой, а светоизлучающий экран – за массивом. Однако обычно он находится на дискретной плоскости, ближайшей к массиву (т.е. соседней с главной диагональю области), другими словами, это либо m -1-я либо $m+1$ -я дискретная плоскость. В таком положении площадь экрана используется наиболее эффективно, без зазоров и перекрытий. В случае линзового раstra, как правило, расстояние до указанной плоскости совпадает с фокусным расстоянием раstra, хотя вообще говоря, это не обязательно и, в частности, не выполняется в т.н. модифицированной интегральной фотографии [158], [159].

Соответствие областей. Расположение дискретных плоскостей и участков подсказывает, что их аналитические описания в разных областях подобны. Такое соответствие позволяет применить описание одной области к другой. Поэтому в аналитическом описании в принципе достаточно рассматривать только одну область из двух. Действительно, как видно из рис. 11, замена переменных

$$\begin{cases} a \leftrightarrow b \\ m \leftrightarrow n \\ x \leftrightarrow -x \\ z \leftrightarrow -z \end{cases} \quad (6)$$

и соответственно

$$c \leftrightarrow c^{-1} \quad (7)$$

преобразует формулы одной области в формулы другой.

Например, из формулы для ширины участков области наблюдения (5в) соответствующую формулу для области изображения (8в) можно получить при помощи правил (6), (7).

Отмеченное выше подобие создает соответствие аналитического описания областей в физическом пространстве в декартовых координатах. Формулы для области наблюдения приведены выше (5а) – (5г), а формулы для области изображения ($i = 0, \dots, 2m$) следующие:

$$l_a(i) = \frac{i}{m(c+1)-i} \cdot \frac{c}{c+1} d \quad (8а)$$

$$\Delta l_a(i) = \frac{mc}{(m(c+1)-i)(m(c+1)-i-1)} d \quad (8б)$$

$$w_b(i) = \frac{c}{m(c+1)-i} a \quad (8в)$$

$$h_b(i) = \frac{2mc}{(m(c+1)-i)^2 - 1} d \quad (8г)$$

С использованием обозначений

$$F_a(c^{-1}, n, i) = (c^{-1} + 1) - i = f_a(i) \quad (9а)$$

$$F_b(c, m, i) = (c + 1) - i = f_b(i) \quad (9б)$$

те же формулы записываются ещё проще. В области изображения:

$$l_a(i) = \frac{i}{f_a(i)} \cdot \frac{c}{c+1} d \quad (10а)$$

$$\Delta l_a(i) = \frac{nc}{f_a(i)f_a(i+1)}d \quad (10б)$$

$$w_a(i) = \frac{c}{f_a(i)}b \quad (10в)$$

$$h_a(i) = \frac{2nc}{(f_a(i))^2 - 1}d \quad (10г)$$

В области наблюдения:

$$l_b(i) = \frac{i}{f_a(i)} \frac{c^{-1}}{c^{-1} + 1}d \quad (11а)$$

$$\Delta l_b(i) = \frac{nc^{-1}}{f_b(i)f_b(i+1)}d \quad (11б)$$

$$w_b(i) = \frac{c^{-1}}{f_a(i)}b \quad (11в)$$

$$h_b(i) = \frac{2nc^{-1}}{(f_b(i))^2 - 1}d \quad (11г)$$

Ниже мы упростим формулы еще больше.

Проективное преобразование. В обеих областях участки имеют повторяющуюся, но непериодическую структуру [160], которая может быть сделана периодической после применения геометрических преобразований, а именно, центральной проекции. В проективных преобразованиях сохраняется ангармоническое отношение (cross-ratio) между четырьмя точками, что позволяет рассматривать коллинеарные точки в дискретных плоскостях в более удобной для данной задачи проективной форме. Автором найдено такое расположение центров и плоскостей проецирования [140] в центральной проекции, при котором спроецированные области и участки имеют периодическую структуру и форму квадрата. Такое расположение областей и их проекций показано на рис. 13. Для каждой области используется своё проективное преобразование; аналитические выражения преобразований в

каждой области отличаются заменой переменных (6), (7).

Расположение центров и плоскостей проекции. На рис. 13 показаны центральные проекции областей на плоскость xu , перпендикулярную квазигоризонтальному сечению, с центрами в точках

$$P_a = (0 \quad g_a \quad -f_a \quad 0)^T \quad (12a)$$

$$P_b = (0 \quad g_b \quad -f_b \quad 0)^T \quad (12б)$$

где g – высота центра проекции (камеры) над плоскостью xz (фактически произвольный параметр), f – расстояние от камеры до экрана (плоскость xu); индексы a и b обозначают область. Исходная (в плоскости xz , диагональ b) и спроецированная (в плоскости xu , диагональ b') области наблюдения отмечены на рис. 13 жирными линиями. Одна из спроецированных областей показана на рис. 14 отдельно.

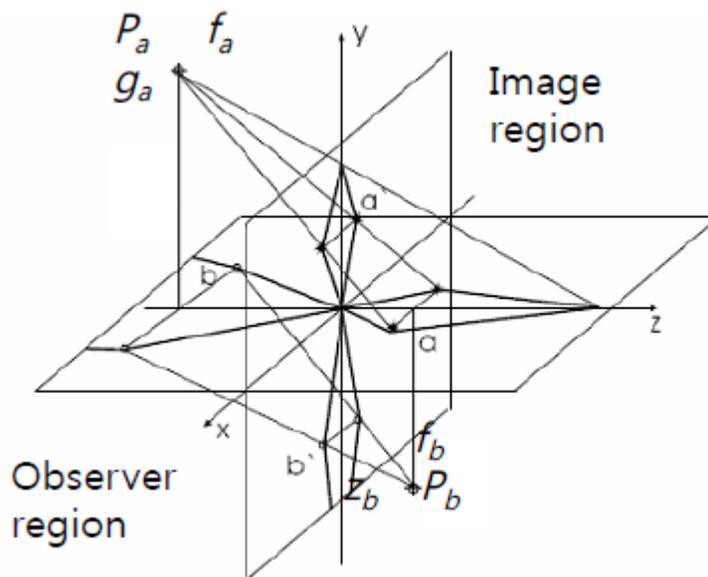


Рис. 13 — Расположение центров, плоскостей проецирования и проекций областей дисплея. Здесь a – диагональ области изображения, b – области наблюдателя; соответственно a' и b' – спроецированные диагонали.

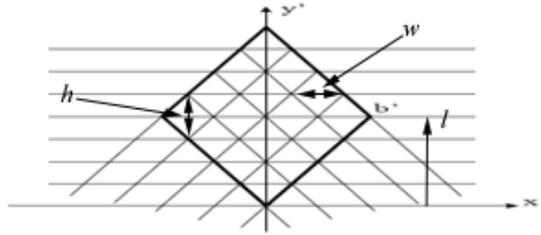


Рис. 14 — Область наблюдения в проективной форме

Такое преобразование описывает преобразование декартовых координат в проективные; его можно записать в однородных координатах с использованием четырёхмерной матрицы

$$(x' \ y' \ z' \ w')^T = M \cdot (x \ y \ z \ w)^T \quad (13)$$

где однородная матрица преобразования (для области изображения) выглядит следующим образом

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{g}{f} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Следует учитывать, что для многоракурсного дисплея должны выполняться определённые физические соотношения, в частности, f как правило, равняется расстоянию d_a между массивом и началом координат (это соответствует $m \pm 1$ -й дискретной плоскости):

$$f = \frac{c^{-1}}{1+c^{-1}} d \quad (15)$$

Соответствующие матрицы для обеих областей

$$M_a = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1+c}{c} \frac{g}{d} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+c}{c} \frac{1}{d} & 1 \end{pmatrix} \quad (16a)$$

$$M_b = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1+c^{-1}}{c^{-1}} \frac{g}{d} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1+c^{-1}}{c^{-1}} \frac{1}{d} & 1 \end{pmatrix} \quad (166)$$

Произвольная константа g участвует только в преобразовании координаты y и поэтому воздействует на масштаб по оси y независимо от других параметров. Изменяя g , можно изменить форму спроецированной области.

Сокращённая матрица. Для практического использования модели не требуется информация по всем трём координатам. Наиболее важны преобразования в плоскостях. Поэтому достаточно использовать сокращённую матрицу (подматрицу уменьшенной размерности), которая описывает отображение плоскости на плоскость.

Такую подматрицу можно получить из полной четырёхмерной матрицы удалением соответствующих строк и столбцов. В случае проецирования плоскости xz на плоскость xu (как показано на рис. 13) из полной матрицы удаляются столбец y и строка z . Тогда сокращённая матрица и обратная ей суть следующие

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{g}{f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (17a)$$

$$H^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{f}{g} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{g} & 1 \end{pmatrix} \quad (176)$$

Преобразование декартовых координат, соответствующее первой из матриц (17):

$$\begin{cases} x' = \frac{x}{1 - \frac{y}{f}} \\ y' = -\frac{g \frac{y}{f}}{1 - \frac{y}{f}} \end{cases} \quad (18)$$

Следует иметь в виду, что при использовании сокращённых матриц, пространственные координаты неявно переименованы в плоские: $z \rightarrow y$.

Для 3D дисплея сокращённая матрица и выполняемое ею преобразование плоскости на плоскость выглядят так

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1+c^{-1}}{c^{-1}} \frac{g}{d} & 0 \\ 0 & -\frac{1+c^{-1}}{c^{-1}} \frac{1}{d} & 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{cases} x' = \frac{x}{1 - (1+c) \frac{y}{d}} \\ y' = -\frac{g}{1 + \frac{1}{1+c} \frac{d}{y}} \end{cases} \quad (20)$$

Спроецированные области. Приведенное выше проективное преобразование (16), (17) обеспечивает периодичность преобразованных элементов в проективном пространстве. В результате спроецированные дискретные плоскости становятся эквидистантными.

В общем случае форма спроецированной области – ромб, разбитый параллельными линиями на одинаковые участки. Выбирая подходящим образом произвольную константу g , определяющую высоту ромба, можно

сделать область и участки квадратными.

Соотношение между декартовыми и проективными координатами модели. В обеих формах представления параллаксы представлены разбиением базы b или спроецированной базы b' на n отрезков (зон наблюдения).

Источники света, однако, представлены по-разному. В декартовой форме они представлены семействами лучей, исходящих из одной точки, тогда как в проективной – семействами параллельных линий; однако в обоих случаях база b' или пересекается в нескольких определённых точках.

Соответствие формул. Приведем формулы для области изображения в проективной форме, в которых дополнительное обозначение $f_a(i) = m(c+1) - i$ также упростилось настолько, что стало независимым от индекса $i = 0, \dots, 2m$, т.е. $f_a'(i) = m(c+1) \equiv f_a'$. С таким обозначением формулы для тех же параметров области изображения, что и (10а) – (10г) в декартовых координатах в проективной форме выглядят ещё нагляднее.

$$l_a'(i) = \frac{i}{f_a'} g \quad (21a)$$

$$\Delta l_a'(i) = \frac{1}{f_a'} g \quad (21б)$$

$$w_a'(i) = \frac{c}{f_a'} a \quad (21в)$$

$$h_a'(i) = \frac{2}{f_a'} g \quad (21г)$$

где штрих означает проецирование.

Как упоминалось выше, для каждой области используется своё преобразование (и своя матрица); приведем соответствующие выражения для области наблюдения:

$$l_b'(i) = \frac{i}{f_b'} g \quad (22a)$$

$$\Delta l_b'(i) = \frac{1}{f_b'} g \quad (22б)$$

$$w_b'(i) = \frac{c^{-1}}{f_b'} b \quad (22в)$$

$$h_b'(i) = \frac{2}{f_b'} g \quad (22г)$$

Полученных соотношений (4) - (22) достаточно для того, чтобы на основании аналитического описания разработать новые эффективные способы формирования и обработки многокурсных изображений, а также построить систему оценки визуального качества.

2.2. Эффективные методы формирования и обработки на основе образцов вокселей

В многокурсных 3D дисплеях изображение физически воспроизводится с двумерного экрана. Чтобы далее развивать трёхмерные способы отображения информации важно знать, как при этом точки трёхмерного пространства отображаются на плоскость экрана.

Для каждой точки существует отображение на указанную плоскость, которое зависит от точных координат точки. В процессе исследования выяснилось, что некоторые характеристики отображения являются инвариантным относительно смещений (в определённых пределах). Учитывая это, можно рассмотреть приближенное отображение трёхмерного пространства на плоскость экрана по участкам, а центр каждого участка считать положением опорной точки (вокселя); тогда в пространстве создаётся дискретная сетка вокселей. Такое отображение создаёт определённое удобство в описании структуры изображения, что в свою

очередь дает возможность построить новые способы формирования и обработки многоракурсных изображений.

Для описания отображения по участкам удобно использовать опорные импульсные функции [161]. На практике эти функции могут быть использованы для построения 3D изображений, измерения расстояния, слежения за наблюдателем, восстановления дальности и т.д.

Геометрические характеристики основных элементов геометрии дисплея (общее расположение, область изображения и т.д.) и их проекций известны из аналитического описания (см. предыдущий раздел). Построим функцию прозрачности в плоскости изображения для точек пространства, находящихся на разных расстояниях.

Сначала определим видимость точечных источников света по ячейкам. Чтобы выяснить, какие источники света видны из области изображения, рассмотрим ход лучей от источников к точкам этой области и найдём точки пересечения этих лучей с плоскостью изображения (экраном). За исключением точек, находящихся в плоскости изображения и на соседних с ней дискретных плоскостях, для всех остальных точек пространства имеется более одной точки пересечения, т.е. они видны в нескольких ячейках экрана [51], см. рис. 15. Тем самым отображение не является непрерывным и разбивается на несколько дробных частей.

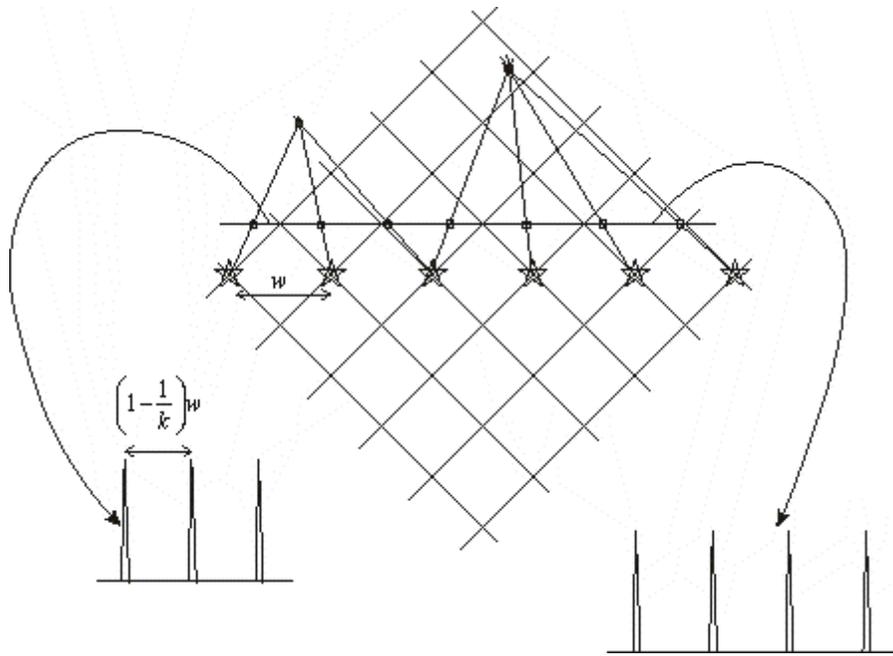


Рис. 15 — Распределение прозрачности (яркости) при отображении точек из разных дискретных плоскостей

Инвариантность. Для построения опорных функций, в частности, важно, что количество дробных частей, на которые разбивается отображение, одинаково для всех точек пространства, расположенных между двумя последовательными дискретными плоскостями. Именно, количество дробных частей равно большему из номеров двух соседних дискретных плоскостей. Это выполняется для всех точек суб-участка.

Для построения аналитической формы отображения рассмотрим в спроецированной области изображения отрезки дискретных плоскостей длины $v = \alpha w$, меньшей чем ширина участков w , т.е., относительная ширина $\alpha \leq 1$; по (21в) их ширина в проективной форме одинакова для всех дискретных плоскостей. Тем самым, мы рассматриваем отображение по участкам. В качестве примера ход лучей для $k = 3$ показан на рис. 16, где отрезок 3-й дискретной плоскости отображается на плоскость изображения, разделяясь

при этом на 3 дробные части.

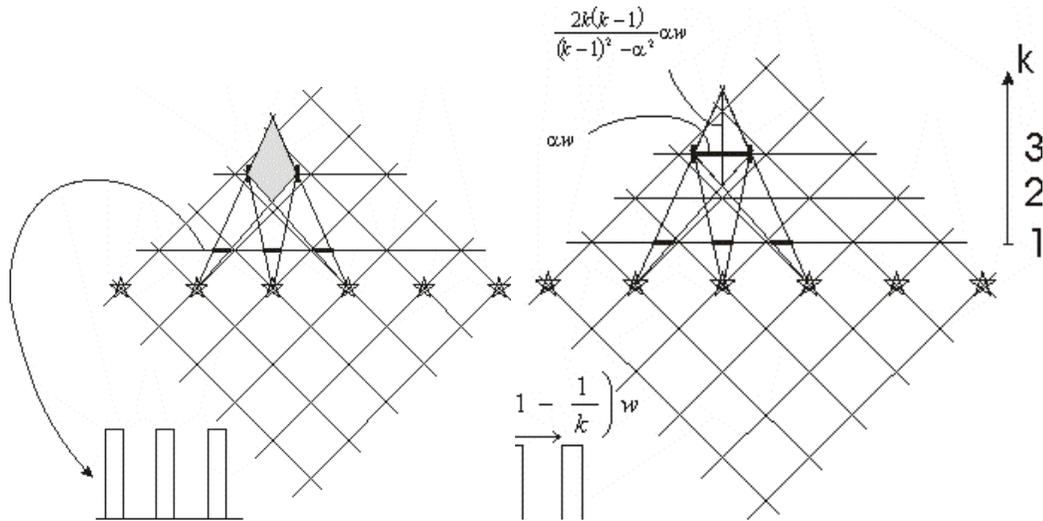


Рис. 16 — Принцип построения опорных функций. Отображение диагонали участка

Описание импульсами. Дробные части отображения отдельных точек можно описать дельта-функциями. Из-за конечной ширины рассматриваемых отрезков дискретной плоскости в каждом участке, функции отображения участка уже не являются дельта-функциями, и их удобнее описывать прямоугольными импульсами. Это импульсы одинаковой ширины и амплитуды, см. рис. 17.

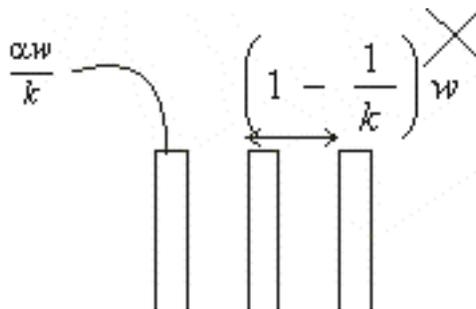


Рис. 17 — Период и ширина импульсов, формирующих опорную функцию участка

Построенные таким способом опорные функции можно аналитически выразить следующим образом

$$\begin{aligned}
& B \left[u \left(\frac{x}{\alpha w} \right) + u \left(\frac{x}{\alpha w} + \frac{k-1}{k} \frac{w}{\alpha w} \right) + u \left(\frac{x}{\alpha w} + 2 \frac{k-1}{k} \frac{w}{\alpha w} \right) \right] = \\
& = B \sum_{i=1}^k u \left(\frac{kx}{\alpha w} + i \frac{k-1}{k} \frac{kw}{\alpha w} \right) = B \sum_{i=1}^k u \left(\frac{kx}{\alpha w} + i \frac{k-1}{\alpha} \right)
\end{aligned} \tag{23}$$

где $u()$ – единичный прямоугольный импульс. Пример опорных функций показан на рис. 18.

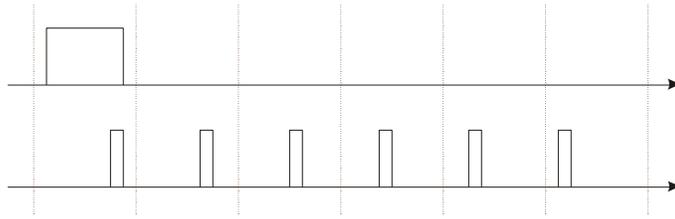


Рис. 18 — Опорные функции для $\alpha = 0.75$, $k = 1$ и 6

Структурные элементы и генерация 3D изображения. По своему физическому смыслу, одномерные опорные функции фактически представляют собой структурные элементы многоракурсных изображений с одномерным параллаксом (т.е. параллаксом только в одном горизонтальном направлении). Такие изображения полноценно воспринимаются при вертикальном положении головы наблюдателя. Положение оси оптического элемента, обеспечивающего параллакс (например, лентичулярной линзы) при этом хотя и близко к вертикальному, но не обязательно является точно вертикальным.

Изображения с полным (двумерным) параллаксом не имеют ограничений на положение головы наблюдателя, в том числе наклонное. В этом случае требуются двумерные функции. Их можно получить из одномерных путём перемножения функций для ортогональных направлений. Полученные таким способом двумерные функции представляют собой структурные элементы многоракурсных изображений с полным (двумерным)

параллаксом и могут быть использованы, например, при синтезировании многоракурсного изображения по точкам (вокселям) [49], [51], [130], [162]. В этом случае воксель находится в центре участка. Поэтому мы будем называть графические представления таких функций в плоскости изображения образцами вокселей. Образцы вокселей для дискретных расстояний создают прямое соответствие между пространством предметов и плоскостью изображения в многоракурсных дисплеях. При этом для любого k вся площадь структурного элемента, распределённого на k ячеек, равна площади одной ячейки изображения. Несколько примеров показано на рис. 19.

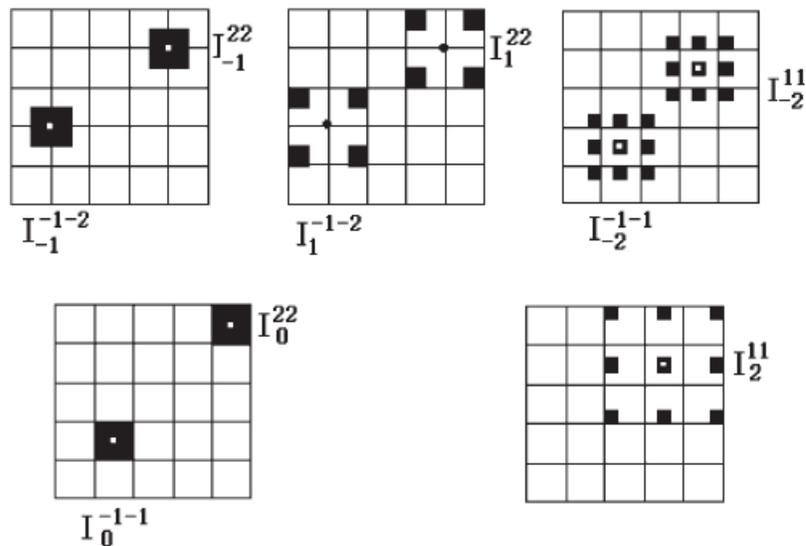


Рис. 19 — Двумерные функции. Образцы вокселей в различных плоскостях

Каждый из образцов соответствует определённым дискретным положениям вокселей в дискретных плоскостях, а в каждой такой плоскости — по двумерной сетке с узлами в центрах отрезков aw . В проективном пространстве воксели распределены по спроецированным участкам равномерно. Такое разбиение пространства удобно для практической реализации способов формирования и обработки многоракурсных изображений, поскольку переход к следующей точке выполняется путем

простого инкремента.

При генерации многоракурсных изображений с использованием векторного описания объекта и образцов вокселей, построенных указанным выше способом, многоракурсное изображение в плоскости изображения синтезируется из двумерных структурных элементов посредством наложения образцов друг на друга соответственно дискретным координатам точек предмета, начиная от самой дальней плоскости.

Заготовленные образцы вокселей для разных расстояний могут быть сгенерированы заранее и храниться в таблице, а затем извлекаться из неё по мере необходимости. Этим значительно сокращается время вычислений при построении многоракурсного изображения. В том отношении, что форма предлагаемых образцов изменяется только при изменении дальности, а не бокового смещения, они имеют определённое сходство с голографическими шаблонами [125].

В случае визуального перекрытия объектов, образцы вокселей в плоскости изображения налагаются друг на друга таким образом, что обеспечивается «автоматическое» блокирование дальних объектов ближними в нужных ракурсах. Это даёт удобную возможность при генерации изображения не заботиться специально о видимости объектов и их частей, тем более, что это может сильно зависеть от ракурса, а просто генерировать изображение путём наложения образцов друг на друга. В этом отношении данный способ сходен с объёмным дисплеем, рассмотренным в первой главе, где также не предпринимается специальных мер для обеспечения визуального перекрытия одних объектов другими. Такое свойство позволяет осуществить генерацию многоракурсных изображений «прямолинейно» по вокселям. Тем самым строится эффективный численный алгоритм генерации многоракурсных изображений

Экспериментальные результаты. Для демонстрации метода формирования многоракурсного изображения по вокселям было построено изображение треугольной пирамиды из образцов вокселей девяти различных плоскостей $|i| \leq 4$. Для рассматривания многоракурсного изображения при помощи ленточной линзы шаблоны налагаются в плоскости изображения, расположенной на расстоянии l_1 .

На рис. 20 показано многоракурсное изображение пирамиды. На рис. 21 приведены образцы вокселей в различных плоскостях z_i , использованные в этом эксперименте.

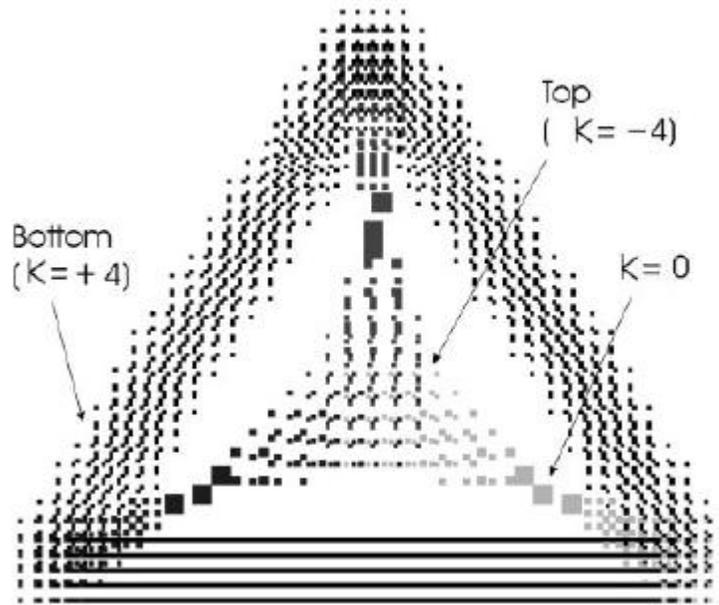


Рис. 20 — Многоракурсное изображение треугольной пирамиды (тетраэдра), построенное с использованием образцов вокселей в плоскости изображения

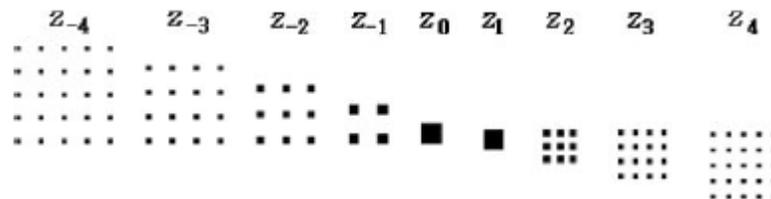


Рис. 21 — Базовые образцы вокселей для $|i|$ до 4 (плоскости $|i| = 0, 1, 2, 3,$
и 4)

Тестовое изображение рис. 20 построено из 40×40 ячеек. Общее количество вокселей данного примера составляет 14400. В построении рис. 20 используются около 150 из них, а именно воксели, расположенные вдоль рёбер тетраэдра. Такая же каркасная форма представления трёхмерных объектов используется в объёмном дисплее (см. гл. 1).

Для воспроизведения сгенерированного изображения бумага с напечатанным многоракурсным изображением прикатывалась (ламинировалась) к двум ортогональным лентичулярным пластинам с шагом 0,5 мм. Несколько фотографий такого сформированного 3D изображения с различных направлений, показаны на рис. 22.

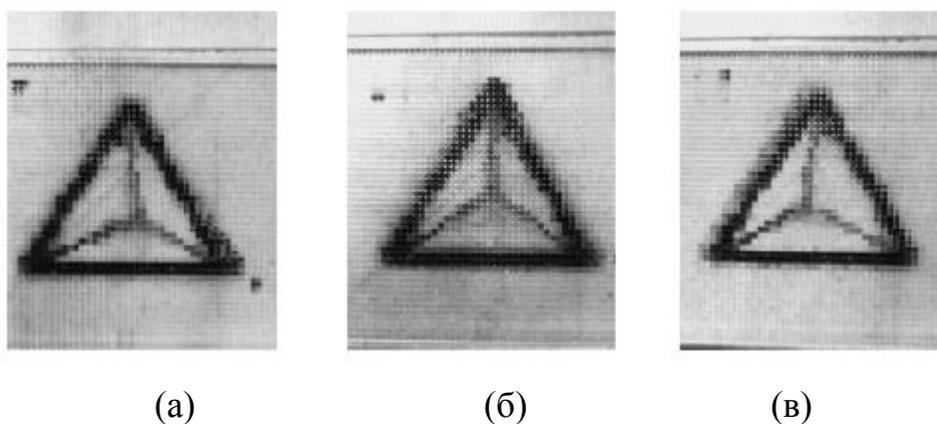


Рис. 22 — Треугольная пирамида (фото): вид слева (а), по центру (б) и
справа (в)

Изображение пирамиды, воспроизведённое при помощи лентичулярной линзы, отчётливо воспринимается как пространственное без специальных очков — это автостереоскопическое изображение. Изображения отдельных ракурсов на рис. 22 демонстрируют различия в параллаксе. Полученное 3D

изображение даёт отчётливое ощущение глубины.

Другой пример многоракурсного изображения показан на рис. 23(а); это туннель квадратного сечения с перспективно сходящимися углами между стенами (вид изнутри) [148], [163]. Фотография 3D изображения, построенного на основе модели, показана на рис. 23(б). Этот эксперимент подготовлен и выполнен совместно с к.т.н. Е.Ф. Пенем.

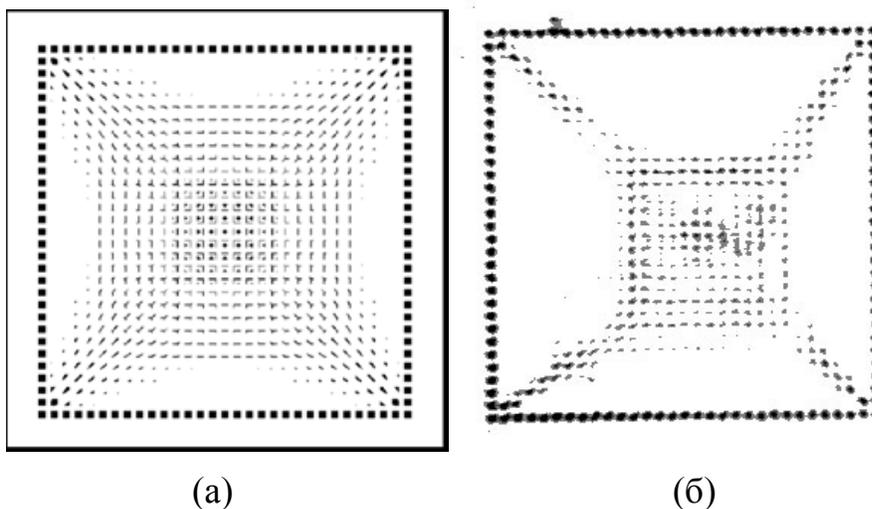


Рис. 23 — Пример формирования изображения туннеля (негатив): (а) многоракурсное изображение, (б) фотография

Образцы можно использовать и в противоположном направлении обработки данных, т.е. для анализа многоракурсных изображений [161] и в частности для восстановления положения трёхмерных объектов в пространстве. В выполненных вычислительных экспериментах [161] ошибка определения дискретной дальности наблюдалась только в 2 - 3% случаев; ошибки определения поперечных координат не было.

2.3. Оценка визуального качества

Детальный анализ характера смешивания ракурсов в пространстве

области наблюдения порождает определение «геометрического» визуального качества многоракурсного изображения как обратной величины количества смешанных компонент изображения (ракурсов) [154]. Это характеристика изображения дисплея, идеального в других отношениях (яркость, контраст). По-существу это способ характеристики перекрёстных помех, который даёт систему геометрической оценки визуального качества. Оценка подтверждена в экспериментах.

Кратные области и характеристическая функция. Чтобы построить функцию качества, требуется проанализировать смешивание компонент по участкам. В этом анализе участвуют списки смешанных компонент изображения, которые несут информацию о ракурсах, видимых из каждого участка. Это сочетания из m по n для каждого суб-участка. Для наших целей нахождения «геометрического» визуального качества важны отличающиеся компоненты, т.е. неповторяющиеся числа в этих списках. В качестве иллюстрации на рис. 24 группами по 4 цифры показаны списки компонент изображения по нескольким суб-участкам для $m = n = 4$. Подобные диаграммы приводятся и в [26], [157], правда без дальнейшего обобщения и без математического описания.

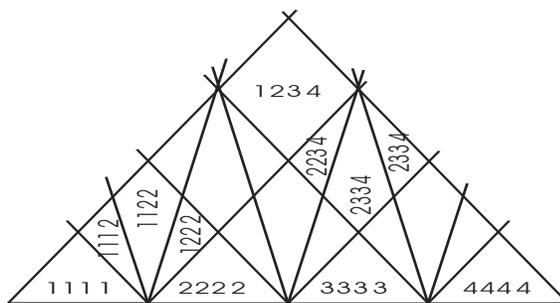


Рис. 24 — Списки компонент изображения по суб-участкам в пространстве модели. Например, запись из 4 чисел 2234 означает, что из данного суб-участка видны: 2-й ракурс, еще раз 2-й, затем 3-й и 4-й.

При этом не исключено влияние на качество изображения отдельных комбинаций или повторяющихся компонент, но здесь их воздействие не рассматривается. Поэтому при подсчёте количества смешанных компонент мы учитываем только отличающиеся друг от друга числа, не повторяющиеся в данном списке. Для иллюстрации, на рис. 25 показано количество различных (характерных) компонент в каждом списке для тех же значений n и m , что и на рис. 24. Например, в нижнем ряду рис. 24 все 4 числа в каждом суб-участке одинаковы, поэтому для них указана 1 компонента, а в самом верхнем участке рис. 24 все 4 числа разные, что означает 4 компоненты. Для суб-участков, скажем, во втором снизу ряду имеем списки 1112, 1122, 1222, все состоящие из 2 компонент, только в разных сочетаниях.

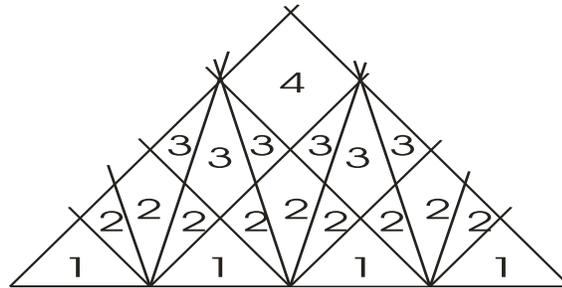


Рис. 25 — Количество существенных компонент по суб-участкам

Вдоль дискретных плоскостей (горизонтальных диагоналей квадратных участков на рис. 25) количество существенных компонент изображения не меняется, а между плоскостями значение качества можно оценить как взвешенное среднее арифметическое с весами, равными относительной ширине отрезков по участкам в зависимости от их расстояния до дискретных плоскостей. Вычисленный таким путём график зависимости количества характерных компонент от дальности на рис. 26 построен для $m = n = 4$. Это периодическая функция в проективном пространстве. Она симметрична относительно середины периода, где равна 2 для любого n .

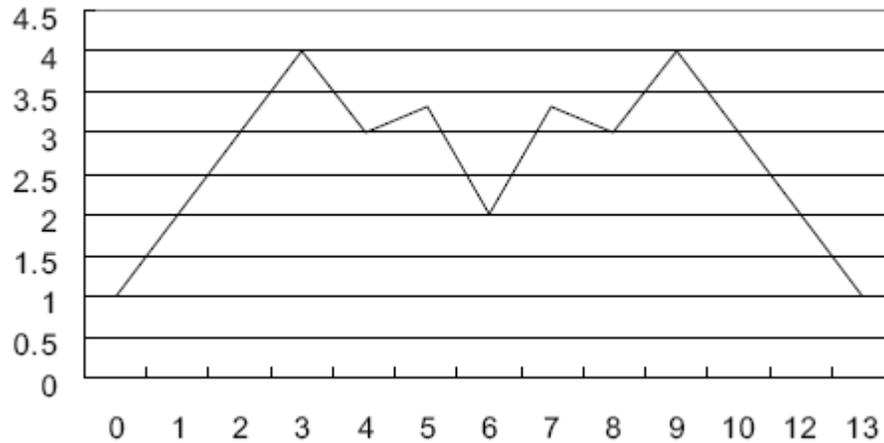


Рис. 26 — Один период характеристической функции в проективном пространстве для $m = 4$

На рис. 26 абсцисса – это номер дискретной плоскости (фактически дискретная относительная координата y'), а ордината – количество характеристических компонент. Период характеристической функции в проективных координатах составляет

$$P = m(n - 1) \quad (24)$$

На графике рис. 26 имеется несколько характерных точек, координаты которых составляют $1/j$ -ю часть всего периода и представлены целыми числами. Значение функции в этих точках составляет $\min(j, n)$, потому что оно никогда не может превзойти числа параллаксов n . Это можно интерпретировать следующим образом. Ракурсы (параллаксы) с одинаковым номером (например, 1-м) встречаются вместе на n -й дискретной плоскости. Два параллакса с разными номерами встречаются на $n/2$ -й и n -й дискретных плоскостях. Три параллакса... и так далее аналогично до меньшего из двух значений j или n . Тем самым можно обобщить описание поведения характеристической функции до бóльших значений m . Другими словами,

$$F(1/j) = \min(j, n), \quad j = 1, \dots, m \quad (25)$$

Тогда поведение функции для любого n выглядит следующим образом. В «ближней зоне» (где $i \leq n$), она растёт линейно от 1 до n . В середине периода имеется V-образный провал между n и 2. В характерных точках (25) она имеет значение (25), к которому обычно приближается также линейно (так происходит потому, что количество существенных компонент меняется между соседними участками только на единицу, см. рис. 25). На других расстояниях она стремится к n , так что её значение там равно или близко к n , что даёт максимальное отличие от 1. Такое поведение представляется характерным для больших m , когда источников света много ($m \gg 1$), и поэтому на произвольном расстоянии картина дробления областей на участки схематически может рассматриваться как близкая к случайной.

График характеристической функции для увеличенного значения $m = 60$, полученный математическим моделированием по указанным в этом разделе принципам, показан на рис. 27.

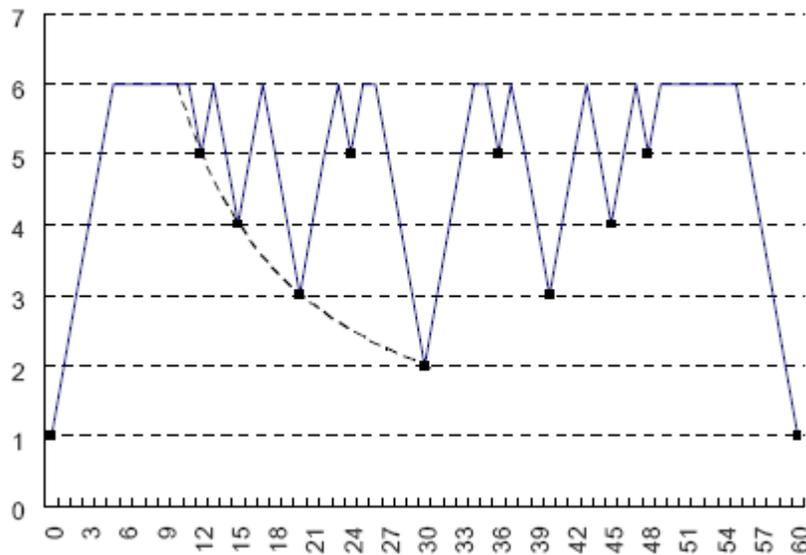


Рис. 27 — Характеристическая функция для $m = 60$

Характерные точки показаны на рис. 27 крупными точками. Огибающая

характерных точек (показана пунктиром) – это гипербола

$$F_e(i) = \frac{N_{tot}}{i} \quad (26)$$

Функция качества моделирует восприятие многокурсного изображения. Эта функция [164] является обратной к характеристической функции (26), а её огибающая возрастает линейно от $1/m$ до $1/2$, см. рис. 28. В соответствии с определением значение функции качества сохраняется вдоль дискретных плоскостей, а также остается постоянным вдоль этих плоскостей и между областями. Кроме того, функция качества в зависимости от стереоскопической диспаратности рассмотрена автором в [165].

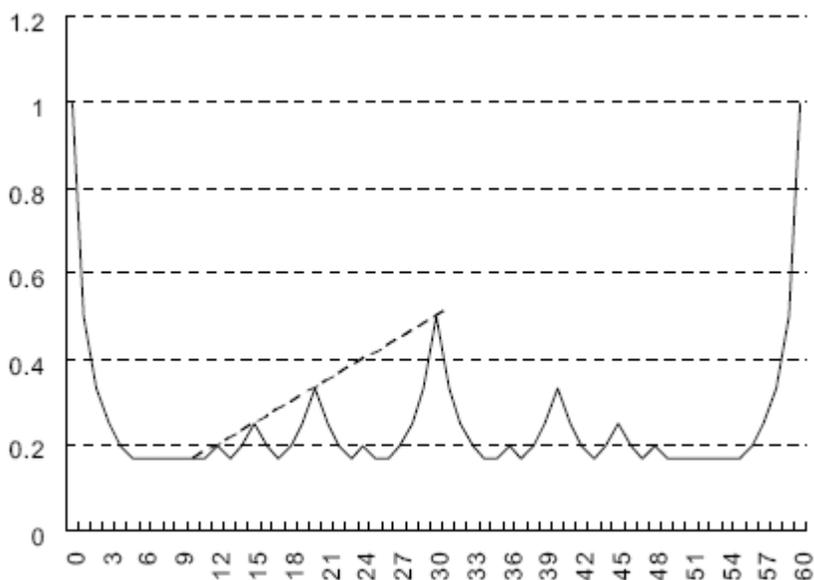


Рис. 28 — Функция качества для $m = 60$ в относительных проективных координатах

Найденные характерные точки вместе с точными значениями функции качества в них позволяют оценивать поведение функции качества в проективных координатах для больших значений числа параллаксов и источников света.

Экспериментальные результаты. Эксперименты по проверке

распределения компонент изображения в пространстве [154] были выполнены с использованием малогабаритного 3D дисплея [166] с одномерным параллаксом, имеющим горизонтальное разрешение 480 пикселей. В качестве оптического элемента, формирующего точечные источники, использовалась барьерная пластина (barrier plate). Для экспериментов были построены специальные тестовые изображения, содержащие 4 вертикальных полосы размером 1 см × 0,25 см, заключенных в квадрат 1 см × 1 см. Сходные тестовые изображения использовались и в других экспериментах, связанных с определением функции качества [164], [165]. Эти изображения воспроизводились в центре дисплейной панели. Цифровая камера, выровненная по центру дисплейной панели, помещалась на дискретную плоскость и сдвигалась механически вдоль горизонтальной оси (параллельно экрану), а в центре каждой области выполнялось фотографирование. Например, для дискретной плоскости $i = 4$ величина сдвига составляла 1,38 см. В пределах каждого участка камера перемещалась также и вдоль направления z до получения отчётливого изображения; тем самым определялся центр участка. На рис. 29 показаны примеры изображений с разной диспарантностью D (в пикселях), наблюдаемых в плоскости при перемещении камеры вдоль дискретной плоскости $i = 4$. Как видно из рис. 29, полосы, соответствующие разным ракурсам (параллаксам) появляются независимо каждая на своём месте по вертикали, не смешиваясь с остальными. Каждое тестовое изображение четко воспроизводит отдельные ракурсы.

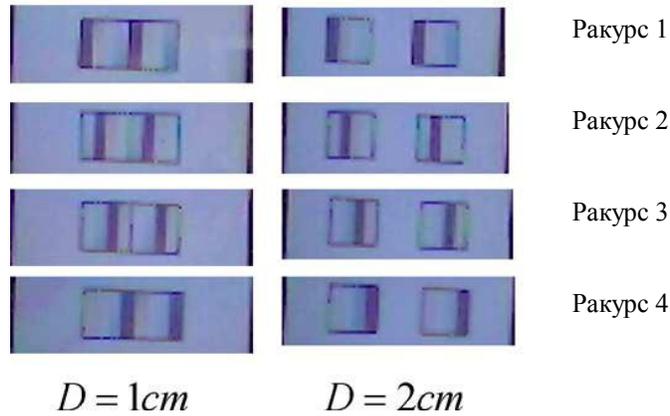


Рис. 29 — Фотографии тестовых изображений с разной диспаратностью, наблюдаемых вдоль дискретной плоскости $i = 4$

На рис. 30 показаны изображения, наблюдаемые в участках зоны наблюдения вдоль плоскости $i = 3$, где видимая картина отличается от плоскости $i = 4$, в которой все ракурсы видны только по одному. Тем не менее, на этих фотографиях каждое тестовое изображение тоже четко воспроизводит отдельные ракурсы, как например, с левой стороны кадров рис. 30 отчётливо видны ракурсы 2, 3 и 4, а с правой – 1, 2, и 3, хотя с правой стороны на отдельных фотографиях иногда заметны признаки соседних ракурсов.

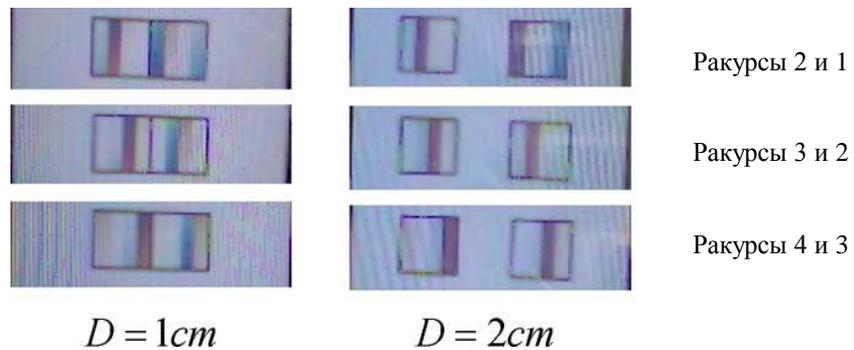


Рис. 30 — Фотографии тестовых изображений, наблюдаемых вдоль дискретной плоскости $i = 3$

Наблюдаемые расстояния составляют 13,5 и 17,0 а вычисленные – 10,5

см и 14,8 см для диспаратности 1 и 2 пикселей соответственно. Горизонтальный шаг составлял 0,75 см и 0,9 см по сравнению с вычисленными по модели значениями 0,58 см и 0,94 см. Различие между вычисленными и наблюдаемыми значениями (нормализованное среднеквадратичное отклонение) составляет 11%.

Выводы к главе 2

На основе выявленных автором характерных структурных элементов (образцов вокселей для дискретных расстояний) представлены новые методы формирования и обработки многоракурсных изображений, предназначенные для режима реального времени. Устройства, созданные по описанным в этой главе принципам, заявлены и запатентованы в нескольких странах.

Образцы вокселей используются для генерации многоракурсных изображений по геометрическому описанию векторного объекта, а также для восстановления расположения объектов в трёхмерном пространстве по их многоракурсным изображениям. Обработка многоракурсных изображений производится с использованием построенных автором образцов вокселей методами синтеза и анализа, ранее не известными в мировой литературе. В частности, при генерации (синтезе) многоракурсных изображений векторного объекта по плоскостям (начиная от самой дальней) вычисление ракурсов не требуется, и поэтому потенциальное быстроедействие в 3 – 5 раз выше, чем при генерации ракурсов. При формировании многоракурсных изображений используются не фотографические или элементарные изображения, как это обычно принято в настоящее время, а геометрическое описание векторного трёхмерного объекта.

В случае визуального перекрытия объектов, образцы вокселей 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 многоракурсные изображения путём прямого наложения образцов вокселей. В этом отношении данный метод формирования сходен с объёмным изображением волнометрического типа, рассмотренным в первой главе.

На основе детального анализа смешивания ракурсов в области наблюдения автором предложена система оценки визуального качества многоракурсных изображений по обратной величине количества смешанных ракурсов. Такая оценка подтверждена в экспериментах. Выбор параметров и система оценки качества позволяют исключить неперспективные в практическом отношении варианты методов формирования многоракурсных изображений. Для этого автором предложено единое аналитическое описание многоракурсных изображений на основе типичной структуры автостереоскопических дисплеев.

Таким образом, автором созданы новые способы формирования и обработки изображений, в частности предложено использовать образцы вокселей для генерации многоракурсных изображений на основе векторного описания объекта по плоскостям.

Результаты этой главы, полученные методами математического моделирования: синтез и анализ многоракурсного изображения, поведение функции качества, смешивание ракурсов. Решена проблема неравномерности разбиения областей на участки, сокращения числа необходимых образцов вокселей (до дискретных плоскостей).

Глава 3. Компьютерное моделирование и минимизация эффекта муара в автостереоскопических изображениях

В настоящей главе описана система математического имитационного моделирования эффекта муара, построена теория минимизации, представлены результаты комплексного исследования эффекта муара в многоакурсных автостереоскопических 3D дисплеях, а также продемонстрирован новый принцип построения оптической системы 3D дисплея.

Эффект муара обусловлен главным образом периодичностью наложенных решёток с кратными периодами, что характерно для оптических элементов типичных автостереоскопических дисплеев. Поэтому основной смысл настоящего исследования эффекта муара состоит в том, чтобы избавиться от него в условиях, провоцирующих его появление. Важность снижения эффекта в автостереоскопических дисплеях была отмечена автором в 2003 г., по-видимому, впервые в литературе.

В диссертации автором предложены два подхода к минимизации эффекта муара в такой ситуации: первый – прямой аналитический, второй – наглядный геометрический в спектральной области. Проведено комплексное исследование эффекта муара с применением современной технологии математического моделирования, вычислительного и физического эксперимента.

Иллюстрация разнообразия муаровских узоров в напечатанных образах и в ЖК панелях показаны на рис. 31, 32.

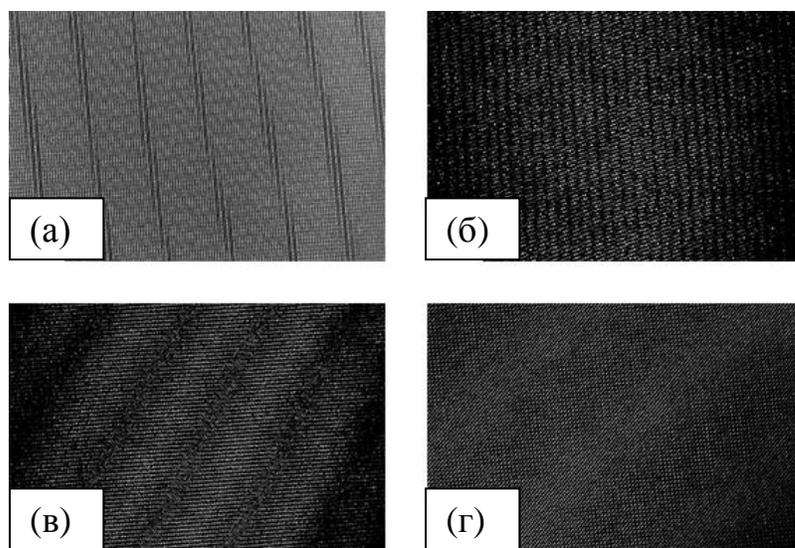


Рис. 31. Примеры экспериментально наблюдаемых муаровских узоров с произвольным σ : (а) $\varphi = 0^\circ$, $\sigma = 1.5$, $\rho = 0.72$; (б) $\varphi = 18^\circ$, $\sigma = 0.33$, $\rho = 0.55$; (в) $\varphi = 33^\circ$, $\sigma = 0.67$, $\rho = 0.55$; (г) $\varphi = 45^\circ$, $\sigma = 0.5$, $\rho = 0.72$.

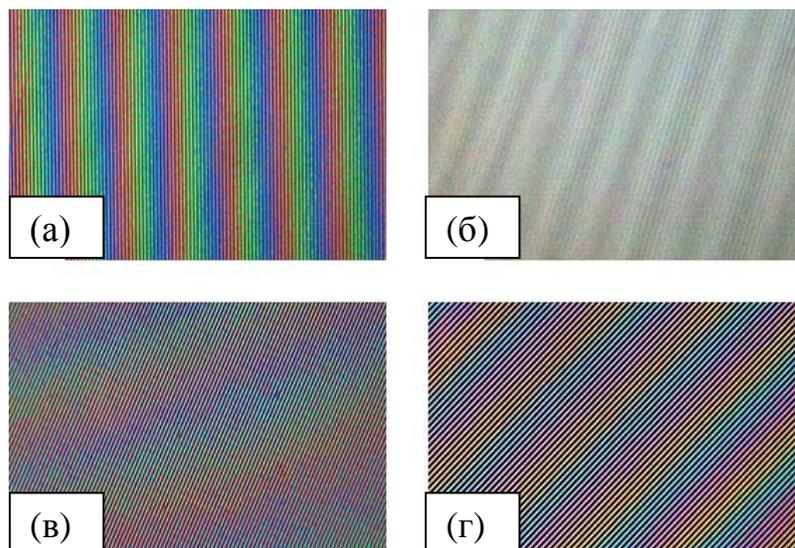


Рис. 32. Примеры экспериментально наблюдаемых муаровских узоров в ЖК панелях при $\sigma = 1$: (а) $\varphi = 0^\circ$, $\rho = 3.00$; (б) $\varphi = 18^\circ$, $\rho = 2.80$; (в) $\varphi = 33^\circ$, $\rho = 2.67$; (г) $\varphi = 45^\circ$, $\rho = 2.80$;

3.1. Прямая минимизация

Прямая минимизация заключается в нахождении аналитическим путём параметров, обеспечивающих минимальное визуальное проявление эффекта муара [103], [129]. В общем случае требуется рассматривать явления отражения и пропускания света. Применительно к 3D дисплеям в диссертации мы описываем оптический элемент (решётку) функцией пропускания.

Основные оптические элементы многоакурсного автостереоскопического дисплея, существенные для воспроизведения 3D изображений (см. гл. 2), можно рассматривать как комбинации плоских одномерных периодических решёток. В частности, квадратная решётка описывается как комбинация двух одинаковых ортогональных линейных решёток, а прямоугольная – двух ортогональных решёток с разным периодом. Экран ЖК панели представляет собой, как правило, решётку, построенную из квадратных пикселей. Соответственно режиму работы (только горизонтальный параллакс или параллакс по двум направлениям), многоакурсный дисплей по отношению к эффекту муара эквивалентен трём или четырём одномерным решёткам, наложенным друг на друга.

В прямой минимизации решётки приближённо считаются синусоидальными, что означает учёт только одной спектральной составляющей профиля решётки. Это в основном соответствует нашему предположению о том, что для эффекта муара наиболее заметными визуально являются низкочастотные составляющие [103]. Учитывая только первую гармонику, мы рассматриваем самые низкочастотные компоненты спектра и их комбинации. Остальные компоненты и комбинации в аналитическом подходе считаются менее заметными и поэтому не учитываются. Тем не менее такого приближения в простых практических ситуациях оказывается достаточно.

Наложение решёток выражается перемножением их функций пропускания [70] (здесь используется т.н. мультипликативная модель оптического взаимодействия). После перемножения вычисляются волновые вектора всех комбинационных составляющих функции пропускания в рамках синусоидального приближения первого порядка, а в результирующем выражении производится селекция компонент по частотам. Это даёт визуальные муаровские волны, которые подлежат минимизации. Таково схематическое описание математической модели эффекта муара, принятой в прямой минимизации.

Соответственно сказанному, функция прозрачности одномерной решётки описывается положительным выражением

$$T_0 = \frac{1 + \cos \vec{k} \cdot \vec{x}}{2} \quad (27)$$

где вектора \vec{k} и \vec{x} – это волновой вектор решётки и локальная координата соответственно. Тригонометрическая функция \cos выбрана из соображений симметрии (положение начала координат для минимизации несущественно). Выражение $\vec{k} \cdot \vec{x}$ – это скалярное произведение векторов, и поэтому аргументом синусоидальной функции является скалярная величина, хотя обе составляющие – вектора.

В нашей задаче участвуют четыре одномерные решётки, организованные в пары, каждая из которых представляет собой комбинированную двумерную решётку с ортогональными одномерными составляющими. В соответствии с этим, выражение для функции пропускания четырёх наложенных решёток выглядит следующим образом

$$T = \frac{1}{16} (1 + \cos \vec{k}_{x1} \cdot \vec{x}_1) (1 + \cos \vec{k}_{y1} \cdot \vec{y}_1) (1 + \cos \vec{k}_{x2} \cdot \vec{x}_2) (1 + \cos \vec{k}_{y2} \cdot \vec{y}_2) \quad (28)$$

где индексами 1 и 2 обозначены комбинированные решётки, а индексами x и

y – элементарные одномерные решётки и их локальные оси. Вектора таких четырёх попарно ортогональных решёток графически проиллюстрированы на рис. 33.

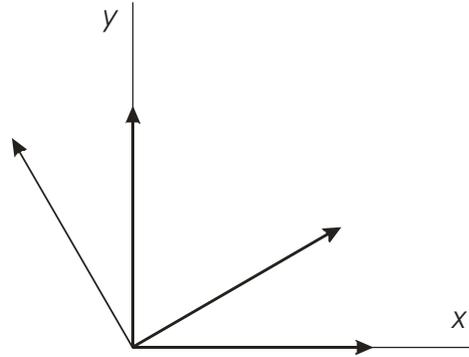


Рис. 33 — Вектора 4 решёток

Соотношение размеров решёток выражается скалярным коэффициентом, также как и соотношение сторон ячейки. Для упрощения дальнейших вычислений, от выражения (28) с аргументом в векторной форме выполним переход к полностью скалярной форме. Это производится при помощи следующих тождеств

$$\begin{aligned}
 \vec{k}_{x1} \cdot \vec{x}_1 &= \sigma k(1,0)(x, y) = \sigma kx \\
 \vec{k}_{y1} \cdot \vec{y}_1 &= k(0,1)(x, y) = ky \\
 \vec{k}_{x2} \cdot \vec{x}_2 &= \rho k(\cos \alpha, \sin \alpha)(x, y) = \rho k(x \cos \alpha + y \sin \alpha) \\
 \vec{k}_{y2} \cdot \vec{y}_2 &= \rho k(-\sin \alpha, \cos \alpha)(x, y) = \rho k(-x \sin \alpha + y \cos \alpha)
 \end{aligned} \tag{29}$$

где величины ρ и α – это отношение периодов комбинированных решёток и угол между ними, а $\sigma \geq 1$ – соотношение сторон ячейки решётки. Для прямоугольных достаточно рассматривать углы от 0 до 180°, а для квадратных решёток – углы от 0 до 45°.

Приведем полученное скалярное выражение функции пропускания со всеми составляющими:

$$\begin{aligned}
T = & \frac{1}{16} [1 + \cos kx + \cos ky + \cos(\rho(\cos \alpha kx + \sin \alpha ky)) + \cos(\rho(\sin \alpha kx - \cos \alpha ky))] + \\
& + \frac{1}{32} \left[\begin{aligned}
& \cos(kx + ky) + \cos(kx - ky) \\
& + \cos((1 + \rho \cos \alpha)kx + \rho \sin \alpha ky) + \cos((1 - \rho \cos \alpha)kx - \rho \sin \alpha ky) \\
& + \cos(\rho \cos \alpha kx + (1 + \rho \sin \alpha)ky) + \cos(\rho \cos \alpha kx - (1 - \rho \sin \alpha)ky) \\
& + \cos((1 - \rho \sin \alpha)kx + \rho \cos \alpha ky) + \cos((1 + \rho \sin \alpha)kx - \rho \cos \alpha ky) \\
& + \cos(\rho \sin \alpha kx - (1 + \rho \cos \alpha)ky) + \cos(\rho \sin \alpha kx + (1 - \rho \cos \alpha)ky) \\
& + \cos(\rho(\cos \alpha - \sin \alpha)kx + \rho(\sin \alpha + \cos \alpha)ky) \\
& + \cos(\rho(\cos \alpha + \sin \alpha)kx + \rho(\sin \alpha - \cos \alpha)ky)
\end{aligned} \right] + \\
& + \frac{1}{64} \left[\begin{aligned}
& \cos((1 + \rho \cos \alpha)kx + (1 + \rho \sin \alpha)ky) + \cos((1 - \rho \cos \alpha)kx + (1 - \rho \sin \alpha)ky) \\
& + \cos((1 + \rho \cos \alpha)kx - (1 - \rho \sin \alpha)ky) + \cos((1 - \rho \cos \alpha)kx - (1 + \rho \sin \alpha)ky) \\
& + \cos((1 - \rho \sin \alpha)kx + (1 + \rho \cos \alpha)ky) + \cos((1 + \rho \sin \alpha)kx + (1 - \rho \cos \alpha)ky) \\
& + \cos((1 - \rho \sin \alpha)kx - (1 - \rho \cos \alpha)ky) + \cos((1 + \rho \sin \alpha)kx - (1 + \rho \cos \alpha)ky) \\
& + \cos((1 - \rho \sin \alpha + \rho \cos \alpha)kx + \rho(\sin \alpha + \cos \alpha)ky) \\
& + \cos((1 + \rho \sin \alpha - \rho \cos \alpha)kx - \rho(\sin \alpha + \cos \alpha)ky) \\
& + \cos(\rho(\sin \alpha - \cos \alpha)kx - (1 + \rho \sin \alpha + \rho \cos \alpha)ky) \\
& + \cos(\rho(\sin \alpha - \cos \alpha)kx + (1 - \rho \sin \alpha - \rho \cos \alpha)ky) \\
& + \cos((1 + \rho \cos \alpha + \rho \sin \alpha)kx + \rho(\sin \alpha - \cos \alpha)ky) \\
& + \cos((1 - \rho \cos \alpha - \rho \sin \alpha)kx - \rho(\sin \alpha - \cos \alpha)ky) \\
& + \cos(\rho(\sin \alpha + \cos \alpha)kx + (1 + \rho \sin \alpha - \rho \cos \alpha)ky) \\
& + \cos(-\rho(\sin \alpha + \cos \alpha)kx + (1 - \rho \sin \alpha + \rho \cos \alpha)ky)
\end{aligned} \right] + (30) \\
& + \frac{1}{128} \left[\begin{aligned}
& \cos((1 + \rho \cos \alpha)kx + (1 + \rho \sin \alpha)ky) + \cos((1 - \rho \cos \alpha)kx + (1 - \rho \sin \alpha)ky) \\
& + \cos((1 + \rho \cos \alpha)kx - (1 - \rho \sin \alpha)ky) + \cos((1 - \rho \cos \alpha)kx - (1 + \rho \sin \alpha)ky) \\
& + \cos((1 - \rho \cos \alpha)kx + (1 + \rho \sin \alpha)ky) + \cos((1 + \rho \cos \alpha)kx + (1 - \rho \sin \alpha)ky) \\
& + \cos((1 - \rho \cos \alpha)kx - (1 - \rho \sin \alpha)ky) + \cos((1 + \rho \cos \alpha)kx - (1 + \rho \sin \alpha)ky) \\
& + \cos((1 - \rho \sin \alpha + \rho \cos \alpha)kx + \rho(\sin \alpha + \cos \alpha)ky) \\
& + \cos((1 + \rho \sin \alpha - \rho \cos \alpha)kx - \rho(\sin \alpha + \cos \alpha)ky) \\
& + \cos(\rho(\sin \alpha - \cos \alpha)kx - (1 + \rho \sin \alpha + \rho \cos \alpha)ky) \\
& + \cos(\rho(\sin \alpha - \cos \alpha)kx + (1 - \rho \sin \alpha - \rho \cos \alpha)ky) \\
& + \cos((1 + \rho \sin \alpha + \rho \cos \alpha)kx + \rho(\sin \alpha - \cos \alpha)ky) \\
& + \cos((1 - \rho \sin \alpha - \rho \cos \alpha)kx - \rho(\sin \alpha - \cos \alpha)ky) \\
& + \cos(\rho(\sin \alpha + \cos \alpha)kx + (1 + \rho \sin \alpha - \rho \cos \alpha)ky) \\
& + \cos(-\rho(\sin \alpha + \cos \alpha)kx + (1 - \rho \sin \alpha + \rho \cos \alpha)ky)
\end{aligned} \right]
\end{aligned}$$

Далее, с использованием соотношения

$$\cos(ax + by) = \cos(\sqrt{a^2 + b^2} x') \quad (31)$$

которое позволяет тригонометрическую функцию линейной комбинации двух переменных выразить как функцию другой переменной, вычисляются периоды всех составляющих результирующей функции пропускания. Это достигается путём подстановки новых переменных

$$\begin{cases} x = x' \cos \theta - y' \sin \theta \\ y = x' \sin \theta + y' \cos \theta \end{cases} \quad (32)$$

где $\tan \theta = b/a$, в выражение (30) почленно.

Коэффициент при новой переменной в аргументе косинуса (31) представляет собой волновой вектор (обратную длину волны) в соответствии с формулами

$$\begin{aligned} k &= \sqrt{a^2 + b^2} \\ \lambda &= \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{\sqrt{a^2 + b^2}} \end{aligned} \quad (33)$$

где a и b взяты из (31). Теперь можно определить периоды всех элементарных волн и убедиться, что среди них для квадратных решёток имеется 18 различных длин волн, а для прямоугольных – 38. Квадраты этих волновых чисел перечислены ниже: для квадратов волновых чисел компонент квадратных решёток получены формулы (34), а прямоугольных – более общие выражения (35), в которые входит параметр σ .

$$\begin{aligned}
& \infty, 1, 1, \rho^2, \rho^2, 1, 1, \\
& \rho^2 + 2\rho \cos \alpha + 1, \rho^2 - 2\rho \cos \alpha + 1, \\
& \rho^2 + 2\rho \sin \alpha + 1, \rho^2 - 2\rho \sin \alpha + 1, \\
& \rho^2 - 2\rho \sin \alpha + 1, \rho^2 + 2\rho \sin \alpha + 1, \\
& \rho^2 + 2\rho \cos \alpha + 1, \rho^2 - 2\rho \cos \alpha + 1, \\
& 2\rho^2, 2\rho^2, \\
& \rho^2 + 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 2, \rho^2 - 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 2, \\
& \rho^2 - 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + 2, \rho^2 + 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + 2, \\
& \rho^2 - 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + 2, \rho^2 + 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + 2, \\
& \rho^2 - 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 2, \rho^2 + 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 2, \\
& 2\rho^2 - 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + 1, 2\rho^2 + 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + 1, \\
& 2\rho^2 + 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 1, 2\rho^2 - 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 1, \\
& 2\rho^2 + 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 1, 2\rho^2 - 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 1, \\
& 2\rho^2 + 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + 1, 2\rho^2 - 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + 1, \\
& 2(\rho^2 + 2\rho \cos \alpha + 1), 2(\rho^2 - 2\rho \cos \alpha + 1), \\
& 2(\rho^2 - 2\rho \sin \alpha + 1), 2(\rho^2 + 2\rho \sin \alpha + 1), \\
& 2(\rho^2 + 2\rho \sin \alpha + 1), 2(\rho^2 - 2\rho \sin \alpha + 1), \\
& 2(\rho^2 + 2\rho \cos \alpha + 1), 2(\rho^2 - 2\rho \cos \alpha + 1)
\end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned}
&0, \sigma, 1, \rho, \\
&\sigma^2 + 1, 2\rho, \\
&\sigma^2 + 2\sigma\rho \sin \alpha + \rho^2, \sigma^2 - 2\sigma\rho \sin \alpha + \rho^2, \\
&\sigma^2 + 2\sigma\rho \cos \alpha + \rho^2, \sigma^2 - 2\sigma\rho \cos \alpha + \rho^2, \\
&1 + 2\rho \sin \alpha + \rho^2, 1 - 2\rho \sin \alpha + \rho^2, \\
&1 + 2\rho \cos \alpha + \rho^2, 1 - 2\rho \cos \alpha + \rho^2, \\
&\sigma^2 + \rho^2 + 2\rho(\sin \alpha + \sigma \cos \alpha) + 1, \sigma^2 + \rho^2 - 2\rho(\sin \alpha + \sigma \cos \alpha) + 1, \\
&\sigma^2 + \rho^2 + 2\rho(\sin \alpha - \sigma \cos \alpha) + 1, \sigma^2 + \rho^2 - 2\rho(\sin \alpha - \sigma \cos \alpha) + 1, \\
&\sigma^2 + \rho^2 + 2\rho(\sigma \sin \alpha + \cos \alpha) + 1, \sigma^2 + \rho^2 - 2\rho(\sigma \sin \alpha + \cos \alpha) + 1, \\
&\sigma^2 + \rho^2 + 2\rho(\sigma \sin \alpha - \cos \alpha) + 1, \sigma^2 + \rho^2 - 2\rho(\sigma \sin \alpha - \cos \alpha) + 1, \\
&\sigma^2 + 2\rho^2 + 2\sigma\rho(\sin \alpha + \cos \alpha), \sigma^2 + 2\rho^2 - 2\sigma\rho(\sin \alpha + \cos \alpha), \\
&\sigma^2 + 2\rho^2 + 2\sigma\rho(\sin \alpha - \cos \alpha), \sigma^2 + 2\rho^2 - 2\sigma\rho(\sin \alpha - \cos \alpha), \\
&1 + 2\rho^2 + 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha), 1 + 2\rho^2 - 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha), \\
&1 + 2\rho^2 + 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha), 1 + 2\rho^2 - 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha), \\
&1 + \sigma^2 + 2\rho^2 + 2\rho(\sigma(\sin \alpha + \cos \alpha) + (\sin \alpha - \cos \alpha)), \\
&1 + \sigma^2 + 2\rho^2 + 2\rho(\sigma(\sin \alpha + \cos \alpha) - (\sin \alpha - \cos \alpha)), \\
&1 + \sigma^2 + 2\rho^2 - 2\rho(\sigma(\sin \alpha + \cos \alpha) + (\sin \alpha - \cos \alpha)), \\
&1 + \sigma^2 + 2\rho^2 - 2\rho(\sigma(\sin \alpha + \cos \alpha) - (\sin \alpha - \cos \alpha)), \\
&1 + \sigma^2 + 2\rho^2 + 2\rho(\sigma(\sin \alpha - \cos \alpha) + (\sin \alpha + \cos \alpha)), \\
&1 + \sigma^2 + 2\rho^2 + 2\rho(\sigma(\sin \alpha - \cos \alpha) - (\sin \alpha + \cos \alpha)), \\
&1 + \sigma^2 + 2\rho^2 - 2\rho(\sigma(\sin \alpha - \cos \alpha) + (\sin \alpha + \cos \alpha)), \\
&1 + \sigma^2 + 2\rho^2 - 2\rho(\sigma(\sin \alpha - \cos \alpha) - (\sin \alpha + \cos \alpha)),
\end{aligned} \tag{35}$$

Поскольку мы намереваемся найти минимальное из выражений (34), (35), многие из них могут быть исключены сразу, как, например, отличающиеся друг от друга на постоянную величину или отличающиеся постоянным коэффициентом. Оставшиеся более десяти уникальных (неповторяющихся) положительных выражений приведены в ниже для случая квадратных решёток.

$$F_i(\rho, \alpha) = \infty$$

$$F_{ii}(\rho, \alpha) = 1$$

$$F_{iii}(\rho, \alpha) = 1 + 2\rho \cos \alpha + \rho^2$$

$$\begin{aligned}
F_{iv}(\rho, \alpha) &= 1 - 2\rho \cos \alpha + \rho^2 \\
F_v(\rho, \alpha) &= 1 + 2\rho \sin \alpha + \rho^2 \\
F_{vi}(\rho, \alpha) &= 1 - 2\rho \sin \alpha + \rho^2 \\
F_{vii}(\rho, \alpha) &= 2 + 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + \rho^2 \\
F_{viii}(\rho, \alpha) &= 2 - 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + \rho^2 \\
F_{ix}(\rho, \alpha) &= 2 + 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + \rho^2 \\
F_x(\rho, \alpha) &= 2 - 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + \rho^2 \\
F_{xi}(\rho, \alpha) &= 1 + 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 2\rho^2 \\
F_{xii}(\rho, \alpha) &= 1 - 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + 2\rho^2 \\
F_{xiii}(\rho, \alpha) &= 1 + 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 2\rho^2 \\
F_{xiv}(\rho, \alpha) &= 1 - 2\rho(\sin \alpha - \cos \alpha) + 2\rho^2
\end{aligned} \tag{36}$$

Теперь на основе нашего предположения об относительной видимости муаровских полос [103] выражения для волновых чисел (36) можно проанализировать на предмет приближения к нулю. В результате остаются только две потенциально "визуально опасных" волны, которые достигают нуля в области определения. Таким способом в синусоидальном приближении определены две наиболее сильные составляющие; в прямоугольном случае это функции (нумерация изменена)

$$\begin{aligned}
F_1(\rho, \alpha) &= \sigma^2 - 2\rho\sigma \cos \alpha + \rho^2 \\
F_{11}(\rho, \alpha) &= \sigma^2 + \rho^2 - 2\rho\sigma \cos \alpha - 2\rho \sin \alpha + 1
\end{aligned} \tag{37}$$

Нули этих функций достигаются на краях области определения в точках

$$\begin{aligned}
(\rho_1, \alpha_1) &= (\sigma, 0) \\
(\rho_{11}, \alpha_{11}) &= \left(\sqrt{\sigma^2 + 1}, \arctan \frac{1}{\sigma} \right)
\end{aligned} \tag{38}$$

Составная функция, представляющая собой наиболее сильную из двух составляющих функций (37), задается оператором

$$F_M(\rho, \alpha) = \min(F_1(\rho, \alpha), F_{11}(\rho, \alpha)) \tag{39}$$

причём поверхность (39) имеет два вышеуказанных минимума (38). Форма этой поверхности для квадратных решёток проиллюстрирована на рис. 34, а её сечения плоскостями $\rho = \text{const}$ показаны на рис. 35.

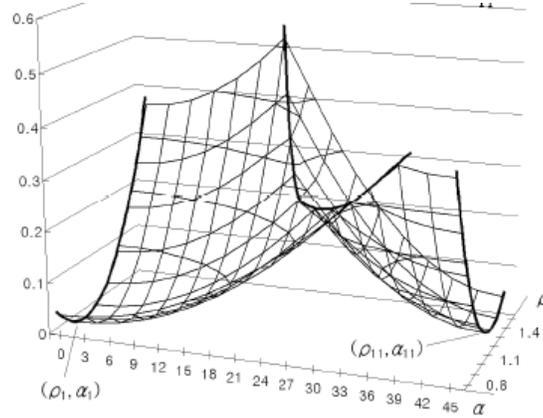


Рис. 34 — Составная поверхность для минимизации эффекта муара в синусоидальном случае

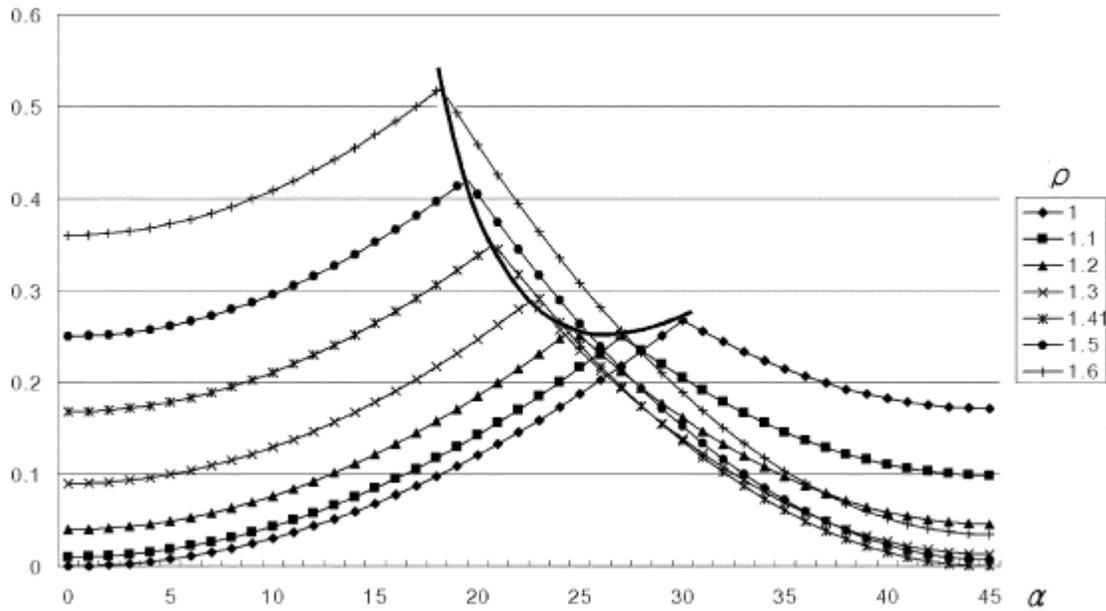


Рис. 35 — Проекция поверхности минимизации

Эта поверхность имеет седловую точку, в районе которой обеспечивается условие минимизации. Найти положение этой точки

аналитически можно двумя способами (точно и приближённо).

В первом случае используются минимальные значения каждой функции в зависимости от угла:

$$F_{1M}(\alpha) = \min_{\rho > \sigma} (F_1(\rho, \alpha), F_{11M}(\rho, \alpha)) = \min_{\rho > \sigma} (F_{11M}(\rho, \alpha)) \quad (40)$$

При этом можно показать, что выражение

$$\rho_1 = \sigma \quad (41a)$$

минимизирует первую функцию во всей области определения, тогда как для второй функции условие

$$\rho_{11} = \sigma \cos \alpha + \sin \alpha \quad (41b)$$

минимизирует её для некоторого определённого угла.

С учётом условий (41a) и (41b) получаем минимальные функции

$$F_{1M}(\alpha) = F_1(\sigma, \alpha) = 2\sigma^2(1 - \cos \alpha) \quad (42a)$$

$$F_{11M}(\alpha) = F_{11}(\sigma \cos \alpha + \sin \alpha, \alpha) = \sigma^2 + 1 - \sigma^2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha - 2\sigma \cos \alpha \sin \alpha \quad (42b)$$

Составная функция (40) достигает минимума в точке пересечения минимальных функций (42a), (42b), т.е. когда

$$F_{1M}(\alpha) = F_{11M}(\alpha) \quad (43)$$

Подставляя сюда выражения (42a) и (42b), получаем, что синус оптимального угла α является корнем уравнения четвёртой степени

$$(1 + 2\sigma^2 + \sigma^4)s^4 - 8\sigma^3s^3 + 2(\sigma^2 - 1)s^2 + 8\sigma^3s + (1 - 4\sigma^2) = 0 \quad (44)$$

где $s = \sin \alpha$. Частные случаи этого уравнения для целых значений параметра $\sigma = 1, 2, 3$ приведены ниже

$$\begin{aligned} 4s^4 - 8s^3 + 8s - 3 &= 0 \\ 25s^4 - 64s^3 + 6s^2 + 64s - 15 &= 0 \\ 100s^4 - 216s^3 + 16s^2 + 21s - 35 &= 0 \end{aligned} \quad (45)$$

вместе с их численными решениями

$$\begin{aligned}
s(1) &= 0.442456 \\
s(2) &= 0.241683 \\
s(3) &= 0.164127
\end{aligned}
\tag{46}$$

которые соответствуют углам

$$\begin{aligned}
\alpha(1) &= 26.261^\circ \\
\alpha(2) &= 13.986^\circ \\
\alpha(3) &= 9.447^\circ
\end{aligned}
\tag{47}$$

Второе (приближённое) решение находится из условия, что в экстремум обеих функций F_1 и F_{11} достигается при одном и том же значении ρ . Проекция линии пересечения поверхностей функций F_1 и F_{11} на плоскость (ρ, α) описывается следующим уравнением

$$2\rho \sin \alpha = 1 \tag{48}$$

Вдоль этой линии обе функции имеют равные значения

$$F_1|_{line} = F_{11}|_{line} = \sigma^2 - \frac{\sigma}{\tan \alpha} + \frac{1}{4 \sin^2 \alpha} \tag{49}$$

Минимум по линии (48) можно найти из условия равенства нулю частных производных на этой линии

$$\frac{\partial F_1}{\partial \alpha}|_{line} = \frac{\partial F_{11}}{\partial \alpha}|_{line} = \frac{2\sigma \sin \alpha - \cos \alpha}{2 \sin^3 \alpha} \tag{50}$$

которое даёт

$$\alpha'(\sigma) = \arctan 1/2\sigma \tag{51}$$

Это и есть искомое приближённое решение, в котором величина угла для целых значений параметра $\sigma = 1, 2, 3$ составляет

$$\begin{aligned}
\alpha'(1) &= 26.57^\circ \\
\alpha'(2) &= 14.04^\circ \\
\alpha'(3) &= 9.46^\circ
\end{aligned}
\tag{52}$$

Точное и приближённое решения графически показаны на рис. 36 окружностями (приближённое решение показано малой окружностью, а точное – большой), представляющим собой увеличенную центральную часть

рис. 35.

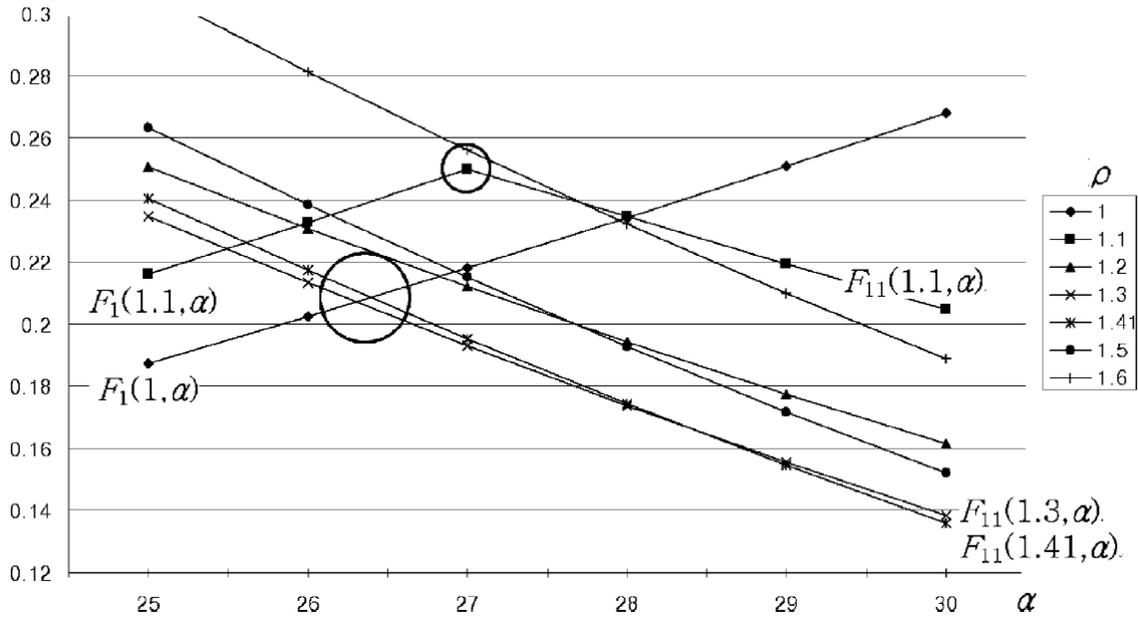


Рис. 36 — Точки пересечения проекций и точное (большая окружность) и приближённое (малая окружность) решения для случая $\sigma = 1$.

На рис. 36 для случая $\sigma = 1$ графически проиллюстрировано, как минимальная функция точного решения для разных ρ составляется из нескольких функций кусочно. Именно, слева от $\alpha(1)$ это функция $F_1(1, \alpha)$, а справа от этой точки – несколько функций F_{11} , из которых на рис. 36 отчётливо различимы по крайней мере две: $F_{11}(1.3, \alpha)$ и $F_{11}(1.41, \alpha)$.

Можно показать, что величины угла, полученные в обоих решениях близки (отличаются не более чем на 0,7%) в области определения.

Существенно, что в обоих случаях положение точки минимизации зависит только от одного параметра σ . Это позволяет рассматривать не точку в пространстве параметров, где это условие выполняется, а по крайней мере линию.

Таким образом, с использованием первого подхода получены формулы

для оптимального угла, обеспечивающего в синусоидальном приближении минимизацию эффекта муара независимо от многих геометрических параметров, чем достигается определённая степень стабильности минимизации.

Приведем практические примеры минимизации на основе синусоидального приближения. На рис. 37 показаны дисплеи с разным углом между оптическими элементами (именно, отличается угол установки лентикулярной линзы).

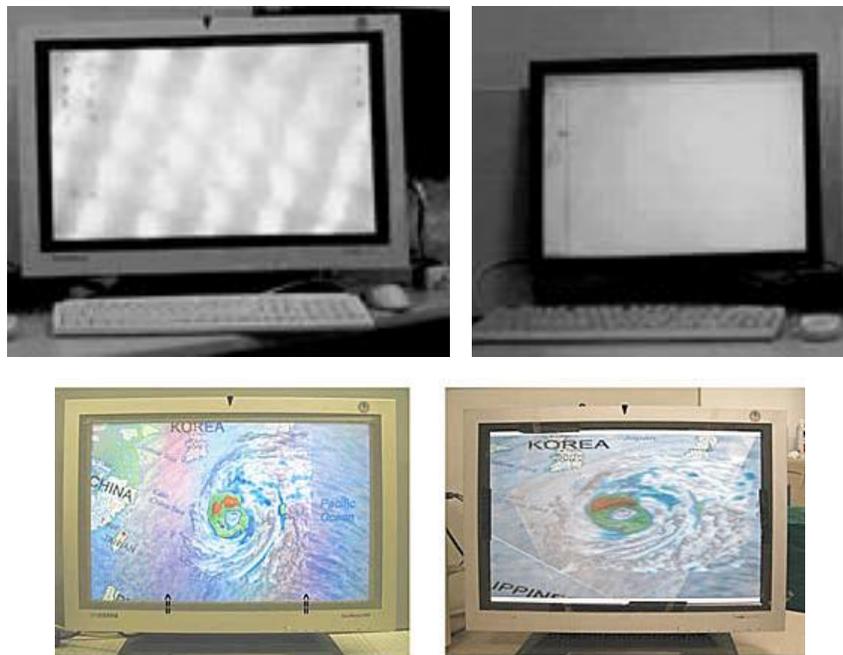


Рис. 37 — Примеры минимизации эффекта муара в разных дисплеях (слева – до минимизации, справа – после неё)

С левой стороны в дисплеях отчётливо видны муаровские полосы, и угол между элементами в них произвольный (а именно, 0 и 45°), а с правой, где муаровских полос практически не видно – угол равен оптимальному углу синусоидального приближения (26.57°).

3.2. Влияние конечного расстояния

Для оценки влияния муаровских узоров на качество изображения важно знать, как воспринимаются муаровские узоры наблюдателем, находящимся в разных положениях относительно экрана, т.е. как они выглядят с того или иного расстояния.

При классическом исследовании эффекта муара традиционно рассматриваются копланарные слои; тем самым наблюдатель эффективно помещается на бесконечность, и тогда визуальное проявление эффекта муара не зависит положения наблюдателя.

Однако в реальных автостереоскопических дисплеях оптические элементы (экран и лентикулярная линза) не находятся в одной плоскости, а расположены на некотором расстоянии друг от друга. Тогда соотношение между видимыми периодами слоёв зависит от места наблюдателя. Это приводит к тому, что муаровские узоры меняются при перемещении наблюдателя, они как бы оживают; это делает их ещё более заметным. Такое их поведение снижает качество изображения и отвлекает внимание наблюдателя. Из-за этого требования к минимизации эффекта муара в 3D дисплеях выше, чем, напр., в типографских изображениях. Следовательно, устранение визуального муара является важной задачей на пути от нынешних автостереоскопических многокурсных дисплейных систем к высококачественному 3D дисплею больших размеров.

В таких обстоятельствах становится необходимым рассмотреть случай эффекта муара для наблюдателя, находящегося на конечном расстоянии и оптическими слоями, расположенными на ненулевом расстоянии друг от друга [167], [168]. В этом случае, визуальный эффект возникает в результате взаимодействия ближней к наблюдателю решётки и спроецированной на неё другой решётки, как показано на рис. 38.

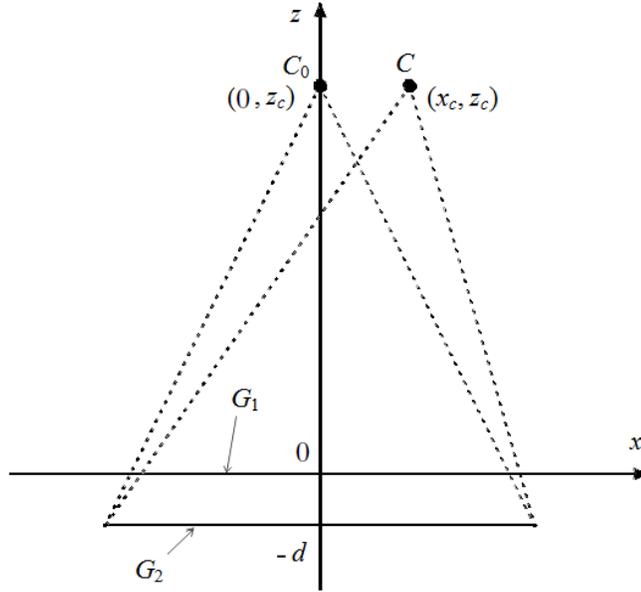


Рис. 38 — Расположение решёток и наблюдателя

Для нахождения периода и фазы муаровских волн, функции пропускания решёток достаточно представить в синусоидальном приближении как

$$G_1 = \cos k_1 x = \cos \frac{2\pi}{\lambda_1} x$$

$$G_2 = \cos k_2 x = \cos \frac{2\pi}{\rho\lambda_1} x. \quad (53)$$

Операцию проецирования удобно описывать в матричной форме. Четырёхмерная матрица такого преобразования найдена в [167]

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -x_c/z_c & 0 \\ 0 & 1 & -y_c/z_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/z_c & 1 \end{pmatrix}. \quad (54)$$

где x_c, y_c, z_c — координаты наблюдателя.

Путём применения преобразования (54) к характерным точкам решёток

(точка первой решётки на расстоянии длины волны, точка второй решётки на оси z), автором получены формулы для периода и смещения муаровских полос [123]

$$\lambda_m = \frac{\rho}{|s - \rho|} \lambda_1 \quad (55)$$

$$x_m = \frac{(s-1)x_c + \rho x_1 - x_2}{s - \rho}. \quad (56)$$

где λ_m , x_m – длина волны и смещение муаровской волны, $\rho = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ – отношение периодов решёток, параметр

$$s = 1 + \frac{d}{z} \quad (57)$$

геометрическая характеристика проекции, x_1 , x_2 , x_c – смещения двух решёток и наблюдателя соответственно. Хотя формулы (55), (56) получены в синусоидальном приближении, они верны не только для синусоидальных решёток.

Выполнены эксперименты по измерению длины волны и смещения муаровских волн в контролируемых условиях [120], [123]. Примеры экспериментальных данных в сравнении с вычисленными теоретическими значениями показаны на рис. 39.

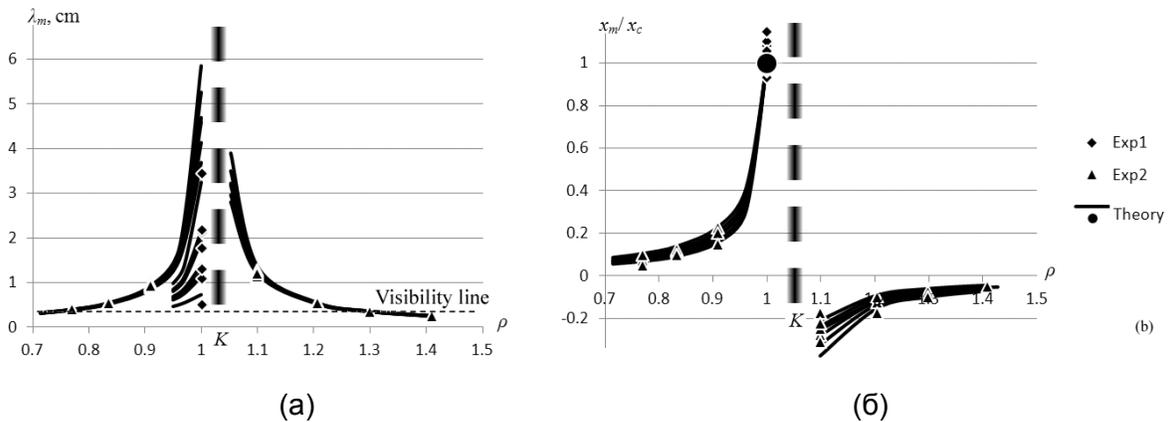


Рис. 39 — Экспериментальные и теоретические данные для (а) длины волны

и (б) относительного смещения муаровских волн на конечном расстоянии.

3.3. Спектральные траектории в комплексной плоскости

Вообще говоря, решётки не обязательно синусоидальны, как это предполагалось в прямой минимизации [103]. Профиль реальной решетки состоит из нескольких спектральных компонент (гармоник). Фундаментальные основы спектрального подхода даны в [70]. Ориентации и ветви муаровских волн рассмотрены автором в плоскости $\lambda\varphi$ [121]. Вообще говоря, необходимо рассматривать все спектральные компоненты, потому что нельзя гарантировать заранее, что какие-нибудь их комбинации не приблизятся к началу координат и не станут видимыми муаровскими волнами. Поэтому решать задачу с бесконечным спектром сравнительно сложно. В то же время, у ограниченного спектра может быть учтена каждая комбинация гармоник. Такой подход основан на затухании коэффициентов Фурье [169], которое позволяет пренебречь спектральными компонентами с высокими номерами. Кроме того, мы рассматриваем одномерные элементарные решетки как плоские полны. Для плоской волны предполагается ограниченный спектр из $Q = 2q + 1$ спектральных пиков, равномерно расположенных вдоль направления волнового вектора, q пиков в каждой полуплоскости. Пределы модулей целых чисел, описывающих гармоники ограниченного спектра, согласно [122] таковы: $|p_j| \leq q_j$, где $q_j \geq 0$ – число компонент с неотрицательными номерами, так что общее число спектральных компонент j -й решетки составляет $Q_j = 2q_j + 1$.

В теории предполагается мультипликативная модель наложения прозрачных слоев. Умножение в пространственной области – это свертка в спектральной области. Для редкого спектра теорема свертки эквивалентна векторному сложению. Векторные суммы могут быть описаны комбинациями

N целых чисел (p_1, p_2, \dots, p_N) , изменяющимися в пределах Q_j . Это делает спектральный подход удобным для ограниченного спектра, состоящего из конечного числа гармоник. Кроме того, двумерный спектр можно удобным образом представить на комплексной плоскости и применять мощные математические теоремы.

На основании концепции окружности видимости [70], схематично моделирующей визуальный аппарат человека в спектральной области, визуальный эффект создаётся комбинациями спектральных компонент наложенных решёток, попавшими в окрестность начала координат. Предположение автора о видимости муаровских волн [103] очень сходно с этой концепцией и хорошо согласуется с экспериментом. На базе этих предположений автором построены теоретические основы графической минимизации в спектральной области [170].

Следующая общая формула для спектральных пиков в комплексной плоскости была получена в [122]; она описывает эффект муара, полученный от N наложенных одномерных несинусоидальных решеток:

$$M = \sum_{j=1}^N p_j k_j e^{i\alpha_j} \quad (58)$$

где M – результат взаимодействия, i – мнимая единица, j – номер элементарной одномерной решётки, k_j (реальное число) – фундаментальный волновой вектор j -й решётки, α_j – угол поворота, p_j – целые числа для перечисления спектральных компонент j -й решётки. Значения k_n , α_n , p_n , q_n описывают n -ю решётку ($n = 1, \dots, N$) следующим образом: два первых значения - это фундаментальный волновой вектор и угол поворота, а p_n – целое число, изменяющееся в пределах $-q_n$ и $+q_n$. Комбинационные компоненты спектра для $N = 2$ показаны на рис. 40 для двух векторов.

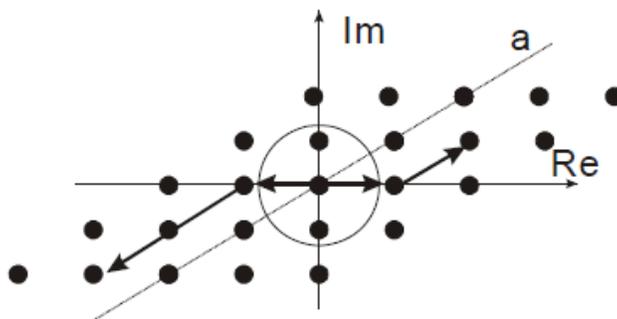


Рис. 40 — Комбинационные частоты двух решёток на комплексной плоскости (синусоидальный случай) как векторные суммы в спектре. Направления фундаментальных волновых векторов двух наложенных решеток – реальная ось и наклонная пунктирная линия.

Базовое выражение (58) устанавливает, что муаровская волна может появиться в результате взаимодействия между (любыми) спектральными компонентами решёток. Ввиду симметрии по отношению к началу координат достаточно рассматривать одну компоненту из каждой пары или эффективно работать с половиной членов (58). Когда один из параметров постепенно меняется, соответствующим образом модифицированное уравнение (58) описывает спектральные траектории муаровских волн.

Пространственное разрешение визуального аппарата человека ограничено. Поэтому некоторые члены уравнения (58) различимы глазом, а некоторые – нет. Для того, чтобы эффект муара проявился визуально, соответствующие точки должны находиться внутри окружности видимости [70]. Окружность видимости грубо моделирует частотную характеристику визуального аппарата человека [171].

Кроме того, наше предположение о видимости [122] означает, что более сильный визуальный эффект происходит от муаровских волн, расположенных ближе к началу координат спектральной области. Это предположение также

относится к частотной передаточной функции. Чтобы определить визуальный эффект, надо выбрать главные члены (58), которые могут стать заметными муаровскими волнами.

Практически важный пример, рассмотренный в [126], [172], это два слоя, каждый из которых состоит из двух решёток; этим моделируется автостереоскопический дисплей, обычно состоящий из двух слоев, каждый из которых представлен одной или двумя одномерными решётками (прямоугольная решётка как суперпозиция двух ортогональных решёток). В этом случае четыре одномерных решётки организованы в две ортогональные пары. Поэтому в практической минимизации максимальное значение N составляет 4. Для такой двухслойной структуры удобно использовать следующий набор параметров

$$k_1 = k\sigma_1, k_2 = k, k_3 = k\sigma_3\rho, k_4 = k\rho, \alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi/2, \alpha_3 = \alpha, \alpha_4 = \alpha + \pi/2 \quad (59)$$

С учётом (59) из (58) имеем

$$M_4 = (p_1\sigma_1 + ip_2) + (p_3\sigma_2 + ip_4)\rho e^{i\alpha} \quad (60)$$

В примере рис. 41 показано суммирование четырёх векторов, как в (60), а метками А и В обозначены векторные суммы внутри и вне окружности видимости.

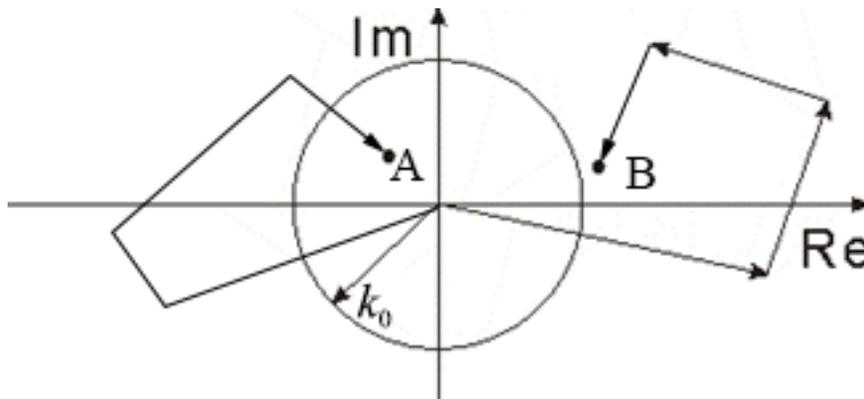


Рис. 41. Векторные суммы в комплексной плоскости

Конкретное выражение для спектральных пиков зависит от структуры слоев, в частности от их размерности. Выражения для пиков для четырёх комбинаций одно- и двумерных элементарных решёток при N до 4 (2, 3 в двух комбинациях, и 4), полученные из (60), выглядят следующим образом:

$$T_{1 \times 1} = p_1 \sigma_1 k + p_3 \sigma_3 k \rho e^{i\alpha}, \quad (61a)$$

$$T_{1 \times 2} = p_1 \sigma_1 k + (p_3 \sigma_3 + ip_4) k \rho e^{i\alpha}, \quad (61б)$$

$$T_{2 \times 1} = (p_1 \sigma_1 + ip_2) k + p_3 \sigma_3 k \rho e^{i\alpha}, \quad (61в)$$

$$T_{2 \times 2} = (p_1 \sigma_1 + ip_2) k + (p_3 \sigma_3 + ip_4) k \rho e^{i\alpha}. \quad (61г)$$

В выражениях (61a) – (61г) числа в индексах показывают комбинацию размерности решёток, напр., 1×2 означает неподвижную одномерную решётку вместе с подвижной двумерной.

Траектория появляется, когда один из параметров является функцией дополнительной переменной t (это не обязательно время). Поскольку в описании эффекта участвуют 4 геометрических параметра σ_1 , σ_3 , ρ , и α , то из каждого из уравнений (61a) – (61г) можно получить 4 вида траекторий.

Например, сочетание 2×1 , представленное в (61в) – практически важное сочетание неподвижного двумерного слоя и подвижного одномерного; эта комбинация соответствует ЖК экрану с барьерной пластиной одномерного параллакса. В этом случае уравнения, вытекающие из (61в) для четырёх меняющихся параметров, выглядят следующим образом:

$$T_{2 \times 1 \alpha}(t) = (p_1 \sigma_1 + ip_2) k + p_3 \sigma_3 k \rho e^{i\alpha(t)}, \quad (62a)$$

$$T_{2 \times 1 \rho}(t) = (p_1 \sigma_1 + ip_2) k + p_3 \sigma_3 k \rho(t) e^{i\alpha}, \quad (62б)$$

$$T_{2 \times 1 \sigma_1}(t) = (p_1 \sigma_1(t) + ip_2) k + p_3 \sigma_3 k \rho e^{i\alpha}. \quad (62в)$$

$$T_{2 \times 1 \sigma_3}(t) = (p_1 \sigma_1 + ip_2) k + p_3 \sigma_3(t) k \rho e^{i\alpha}, \quad (62г)$$

Для другого частного случая четырёх одномерных слоёв (решёток), который характерен для многоракурсных дисплеев с полным параллаксом, из

уравнения (61г) можно получить следующие формулы спектральных траекторий двух наложенных двумерных структур для четырёх изменяющихся параметров

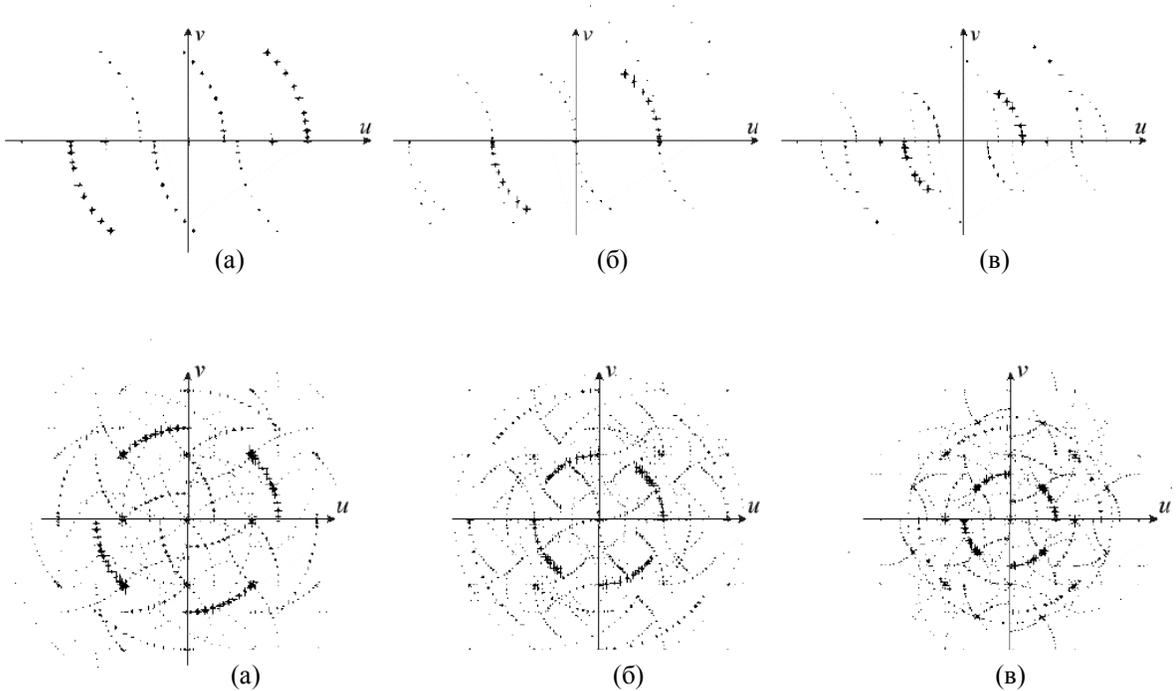
$$T_{2 \times 2 \alpha}(t) = (p_1 \sigma_1 + ip_2)k + (p_3 \sigma_3 + ip_4)k \rho e^{i\alpha(t)}, \quad (63a)$$

$$T_{2 \times 2 \rho}(t) = (p_1 \sigma_1 + ip_2)k + (p_3 \sigma_3 + ip_4)k \rho(t) e^{i\alpha}, \quad (63б)$$

$$T_{2 \times 2 \sigma_3}(t) = (p_1 \sigma_1 + ip_2)k + (p_3 \sigma_3(t) + ip_4)k \rho e^{i\alpha}, \quad (63в)$$

$$T_{2 \times 2 \sigma_1}(t) = (p_1 \sigma_1(t) + ip_2)k + (p_3 \sigma_3 + ip_4)k \rho e^{i\alpha(t)}. \quad (63г)$$

Для иллюстрации приведём картины траекторий для разных сочетаний размерности решёток и разных значений параметров, полученных в эксперименте [122]. При этом уравнениям (62б), (63б) соответствуют 3-й и 4-й ряды. Траектории, полученные моделированием, будут приведены в разд. 3.4 ниже.



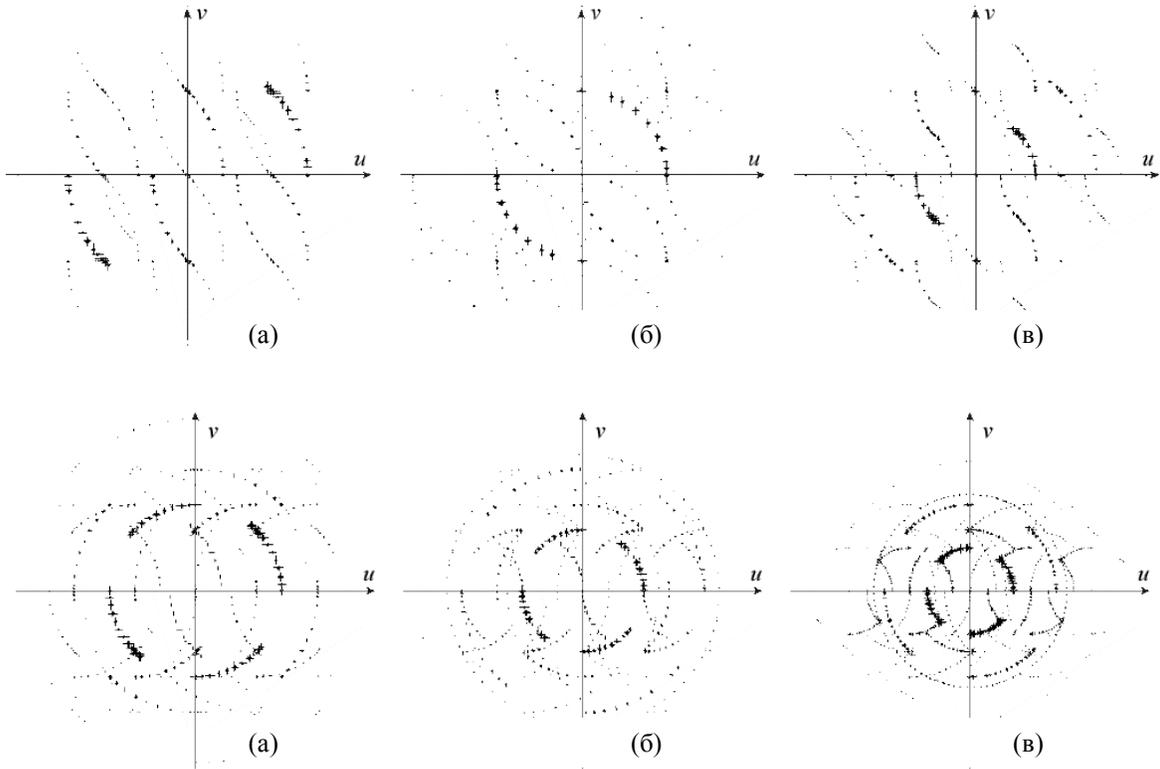


Рис. 42 — Спектральные траектории, полученные в физическом эксперименте $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ с углом, изменяющимся от 0° до $50-70^\circ$; в каждом горизонтальном ряду разные размерности решёток и $\rho = 0.71, 1.0, 1.4$.

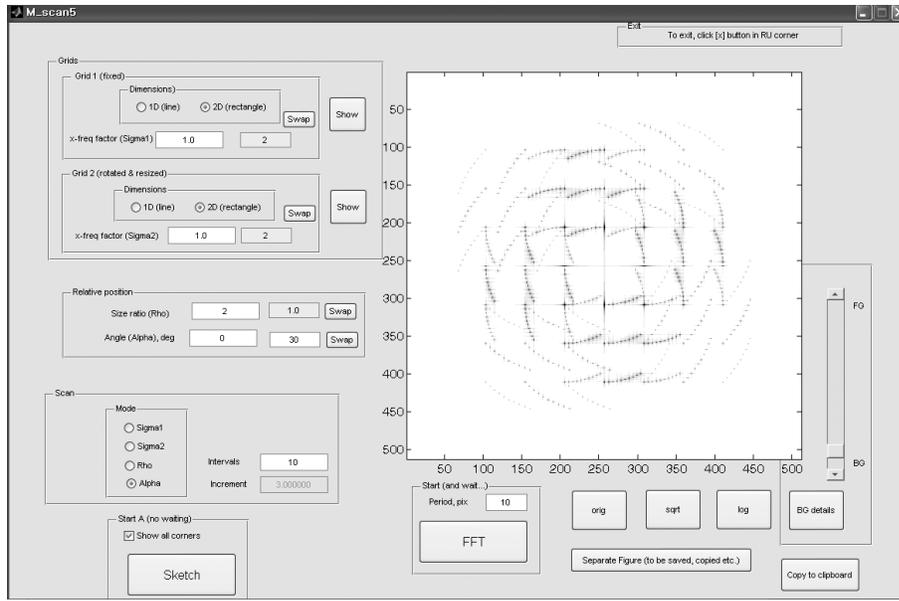
3.4. Средства компьютерного моделирования эффекта муара

Чтобы снизить эффект муара в автостереоскопических дисплеях мы разработали теорию минимизации, основанную на траекториях в спектральной области; теория практически реализована в средствах компьютерного моделирования, обеспечивающих изучение поведения муаровских волн в диапазоне параметров. Параметры включают такие как смещение наблюдателя и его расстояние до экрана. В работе автора [168] описано моделирование в синусоидальном случае. Моделирование синусоидальных волн [123] дало приемлемые результаты; с другой стороны

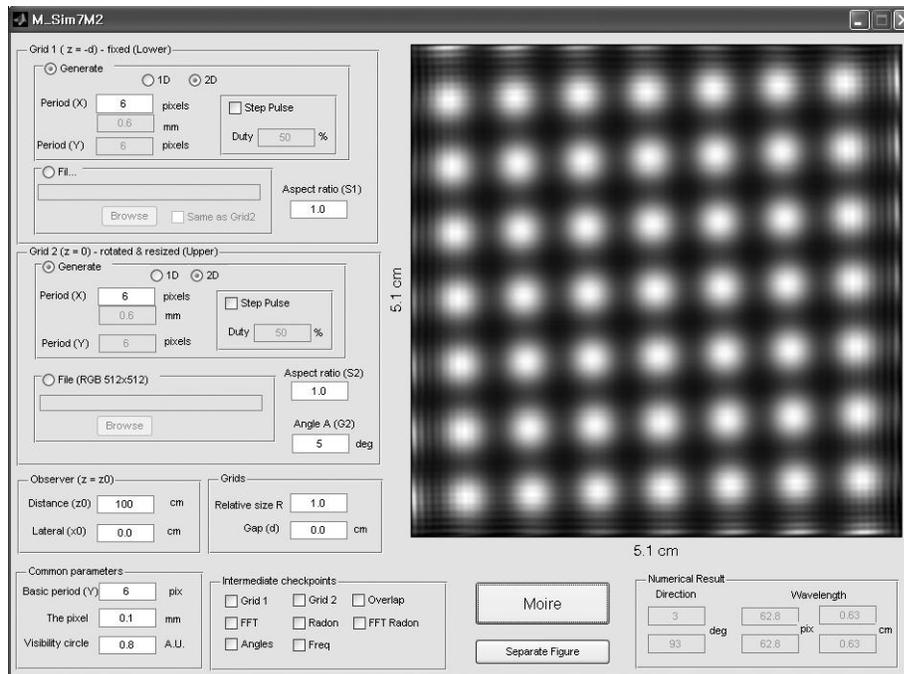
ясно, что синусоидальное приближение может оказаться не достаточно точным для всех реальных ситуаций.

Поэтому в [173] представлено несинусоидальное моделирование, основанное на расширенном ограниченном спектре. Средства моделирования работают в двух режимах (обзорном и детальном) и управляются интерактивно. Параметры результирующих муаровских волн измеряются полуавтоматически. Типичное нормализованное среднеквадратичное отклонение между компьютерным моделированием и физическим экспериментом составляет 3 – 5%.

Программа моделирования основана на мультипликативной модели, преобразовании Фурье наложенных решёток (плюс проективное преобразование) и концепции окружности видимости [70]. Средство моделирования (см. рис. 43) позволяет отслеживать спектральные пики и выполнять полуавтоматические измерения; оно может работать в двух режимах, обзорном и детальном. Обзорный режим показывает общую картину спектров и траекторий, а детальный режим показывает конкретный визуальный эффект. Компьютерное моделирование в основном выполнено для черно-белых синусоидальных решёток, сгенированных компьютером [168], хотя при моделировании могут использоваться и произвольные решетки из внешнего файла.



(а)



(б)

Рис. 43. Средство моделирования. (а) обзорный режим, (б) детальный режим.

Приведем траектории (62а) – (62г), полученные путём математического моделирования в обзорном режиме [126], [172] сначала для четырёх

различных параметров как в (61) (см. рис. 44), а затем по каждому параметру отдельно на рис. 45 – 48, где части (б) и (в) соответствуют уравнениям (62) и (63).

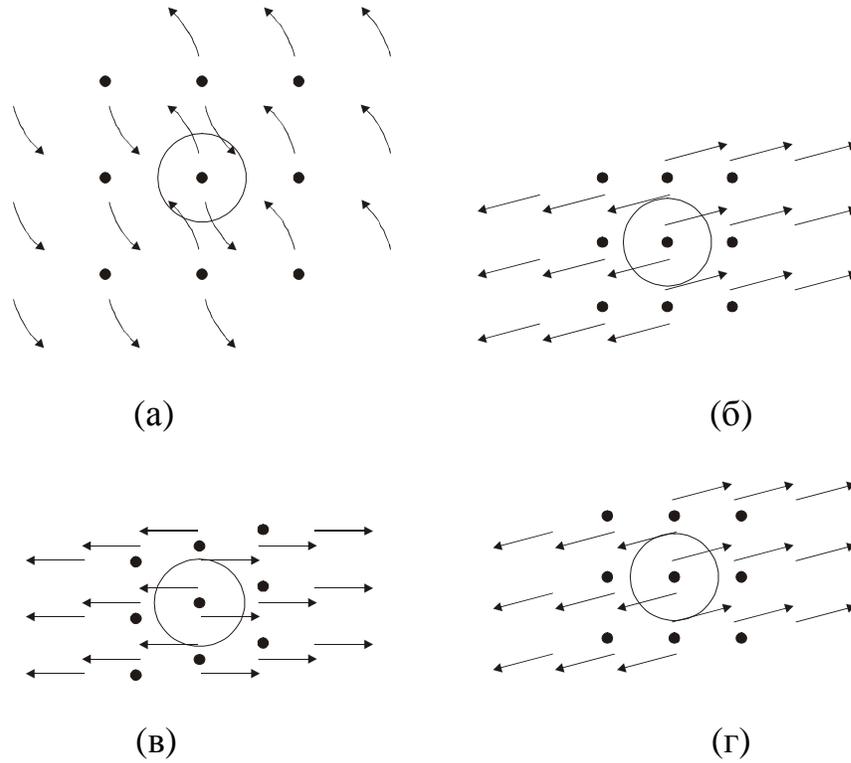


Рис. 44. Примеры спектральных траекторий с одной гармоникой (синусоидальный случай), полученные моделированием для различных меняющихся параметров; на (а) .. (г) изменяющиеся параметры: α , ρ , σ_1 , и σ_3 , соотв.

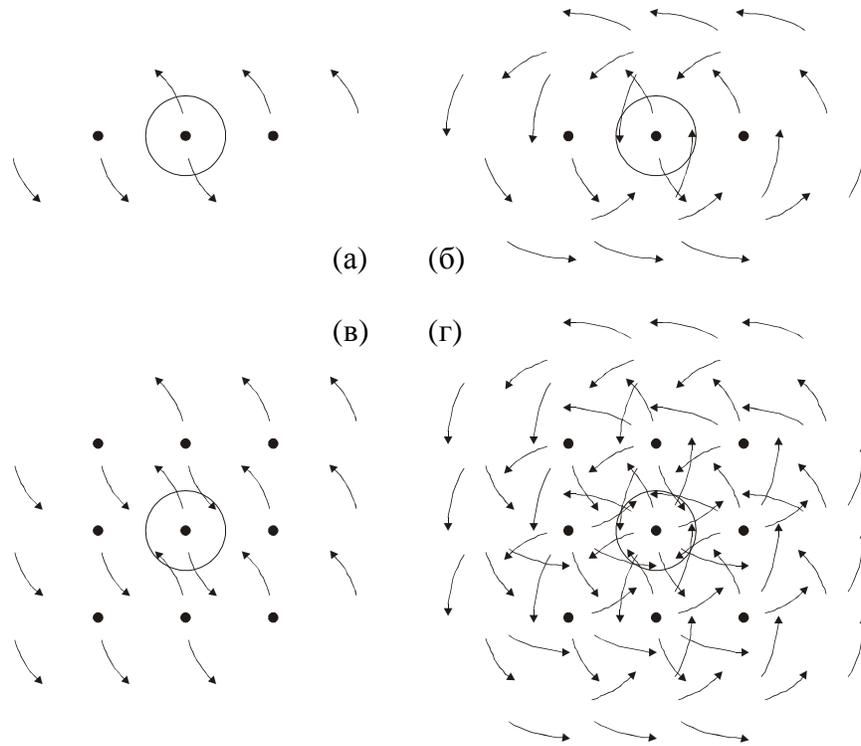


Рис. 45 — Спектральные траектории в комплексной плоскости, представляемые комплексными числами (моделирование). Угол α меняется от 15° до 30° , $\rho = \sigma_1 = \sigma_2 = 1$.

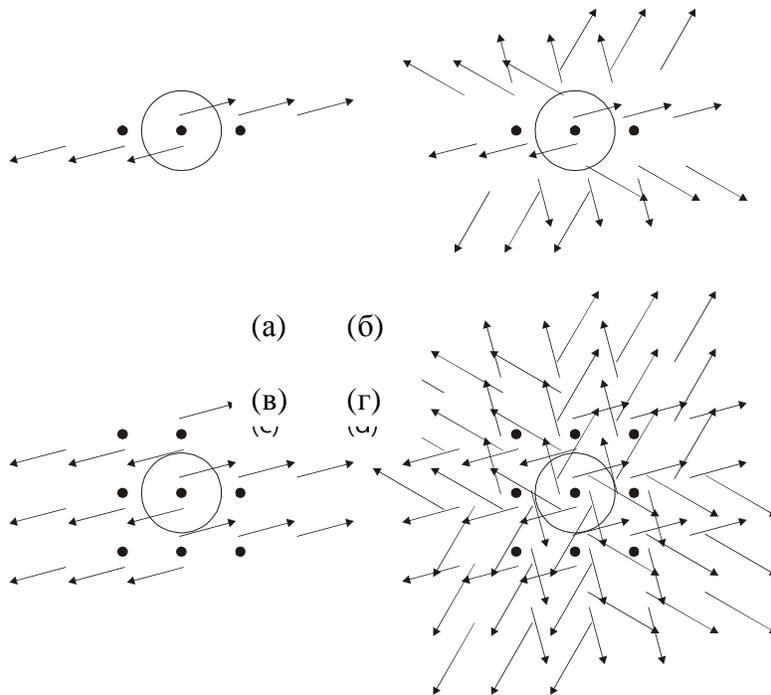


Рис. 46 — Моделирование изменения параметра ρ от 1 до 2 при $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$, $\alpha = 15^\circ$.

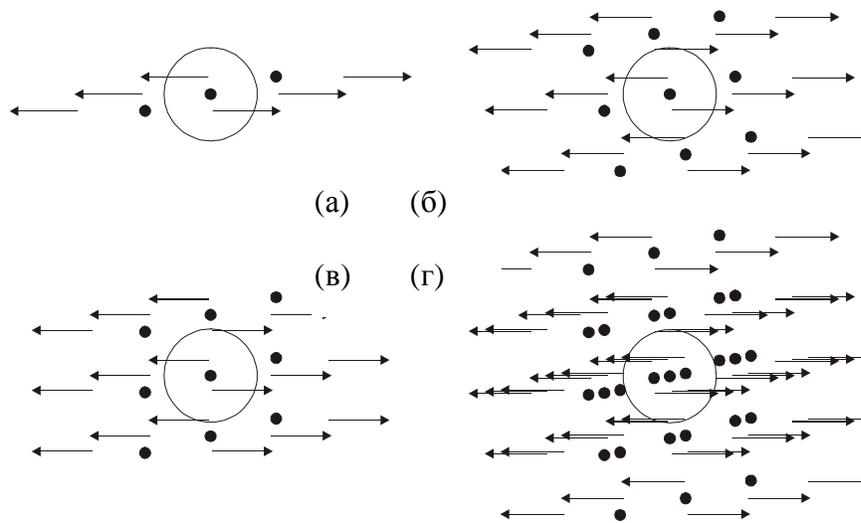


Рис. 47 — Моделирование изменения σ_1 от 1 до 2 при $\rho = \sigma_2 = 1$, $\alpha = 15^\circ$

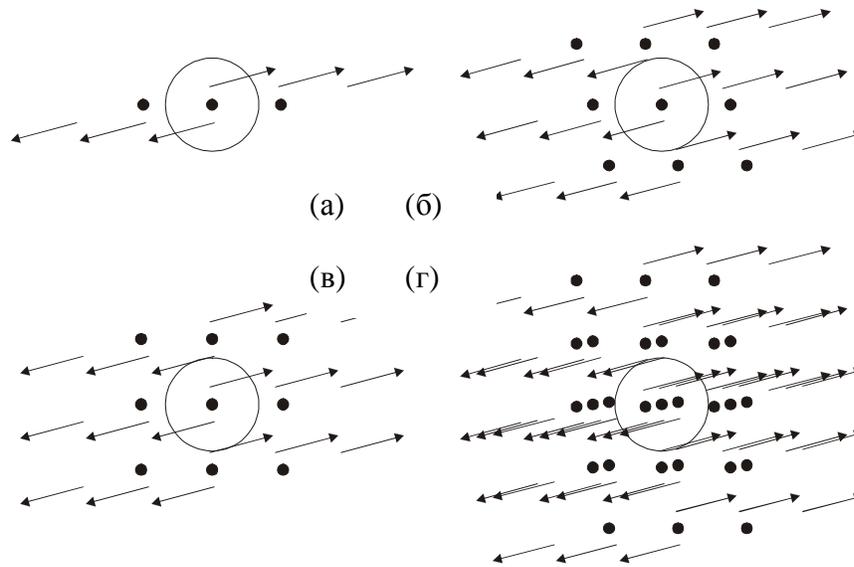


Рис. 48 — Моделирование изменения σ_2 от 1 до 2 при $\rho = \sigma_1 = 1$, $\alpha = 15^\circ$.

Иллюстрации рис. 45, 43 – 45 показывают значительное сходство результатов моделирования с экспериментом рис. 42.

Результаты моделирования муаровского эффекта на конечном расстоянии отличаются от теории значительно меньше 5% и поэтому графически на рис. 39 не показаны. Прямое же сравнение муаровских узоров в 3D дисплее с результатами имитационного моделирования в детальном режиме [123] (см. рис. 49) показывает незначительное различие между ними (в пределах 2 - 4% по двум параметрам).

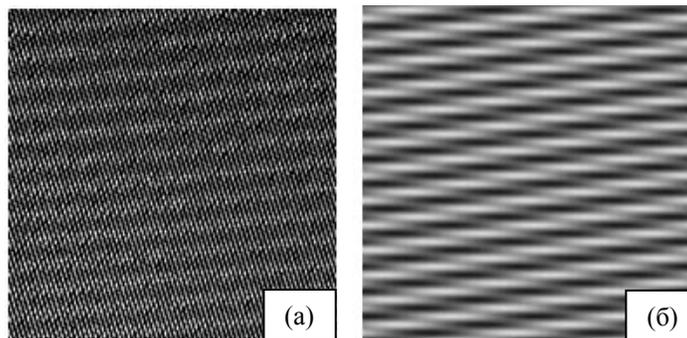


Рис. 49 — Сравнение результатов моделирования (а) с реальным дисплеем (б)

Недавно [173] средство моделирования было усовершенствовано для несинусоидальных волн. При этом число спектральных компонент увеличено до 3. Целые числа p_j в уравнениях (61a) – (62г) изменяются между -1 и 1 в синусоидальном случае и между -3 и +3 в несинусоидальном (расширенный ограниченный спектр). Это позволило выполнить комплексное исследование.

3.5. Комплексное исследование эффекта муара

На основе представленной выше теории с использованием разработанных средств компьютерного моделирования [173] выполнено комплексное исследование эффекта муара [124], которое позволило определить параметры минимизации. В комплексном исследовании выполнено несинусоидальное моделирование, а также найдены дискретные муаровские углы.

Прежде всего следует заметить, что почти все ранее экспериментально наблюдаемые траектории [123], [126] относятся к синусоидальному случаю. Однако траектории с $\rho = 1$ и $\rho = 2$, представленные в [122], уже содержат большее количество компонент и фактически включают первую и вторую гармонику профиля решётки. Эти последние экспериментальные траектории тесно связаны с практическим моделированием, поскольку указанные выше значения параметров «дают подходящее объяснение экспериментальным спектральным траекториям в несинусоидальных решётках», как сообщается в [122].

С целью сокращения вычислений в случае расширенного спектра некоторые комбинации целых чисел временно исключены из моделирования. В частности, траектории для квадратной решётки в сочетании с линейной решёткой отслежены только в одном квадранте в пределах углов 45° ; траектории из некоторых центров исключены (которые не могут

приблизиться к началу координат в текущей комбинации параметров). Примеры траекторий с 3 спектральными компонентами в каждой решётке показаны на рис. 50.

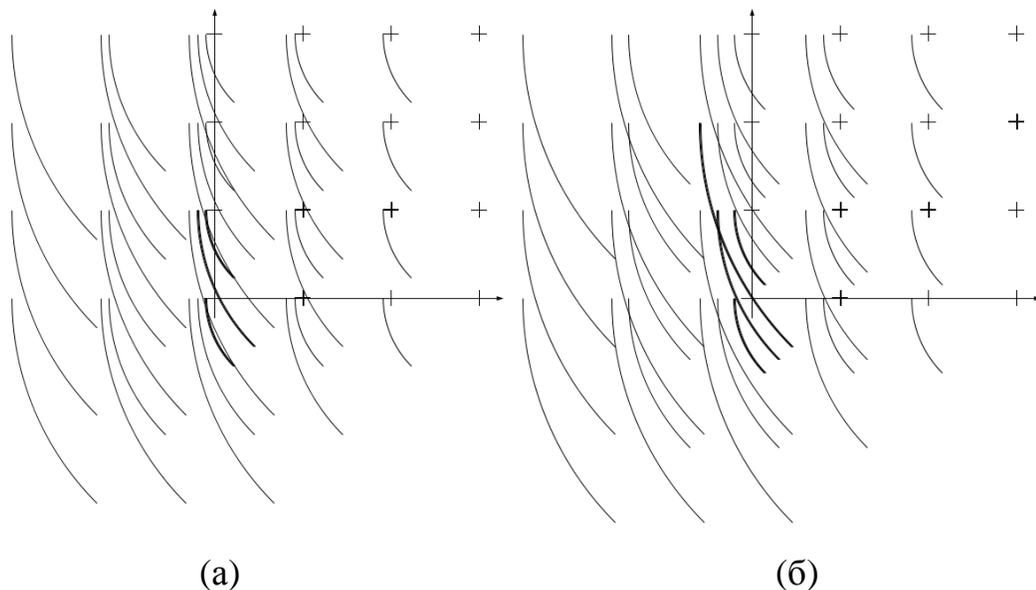


Рис. 50. Спектральные траектории с 3 гармониками (несинусоидальный профиль) для (а) $\rho = 1.1$ и (б) $\rho = 1.2$, полученные моделированием.

Из картины траекторий для $\rho = 1.1$ на рис. 50(а) видно, что длинные муаровские волны должны появиться на угле 27° ($\arctan 1/2$), а короткие – на углах 0 и 45° ($\arctan 0$ и $\arctan 1$); эти комбинационные частоты попадают внутрь окружности видимости. Аналогично, в случае $\rho = 1.2$, показанном на рис. 50(б), муаровские волны должны появиться на углах 0 , 27° , 45° ($\arctan 0$, $\arctan 1/2$, и $\arctan 1$); в этом случае также имеется муаровская волна на угле 33° ($\arctan 2/3$), но ее яркость значительно ниже.

Для подтверждения результатов моделирования муаровские узоры непосредственно наблюдались в компьютерно сгенерированных решётках при тех же условиях, что и на рис. 50, как показано на рис. 51, 52. При этом на рис. 51(а), 51(в), 52(а) – 52(в) муаровские узоры почти параллельны оси

повернутой решётки, тогда как на рис. 51(б) – нет. Это не ошибка; конфигурация спектральных траекторий подтверждает, что в этом случае соответствующая траектория с центром в (2, 1) проходит близко к началу координат (чуть выше его), что вызывает очень резкое изменение муаровского угла, и установление точного соответствия углов в эксперименте сопряжено с определенными трудностями.

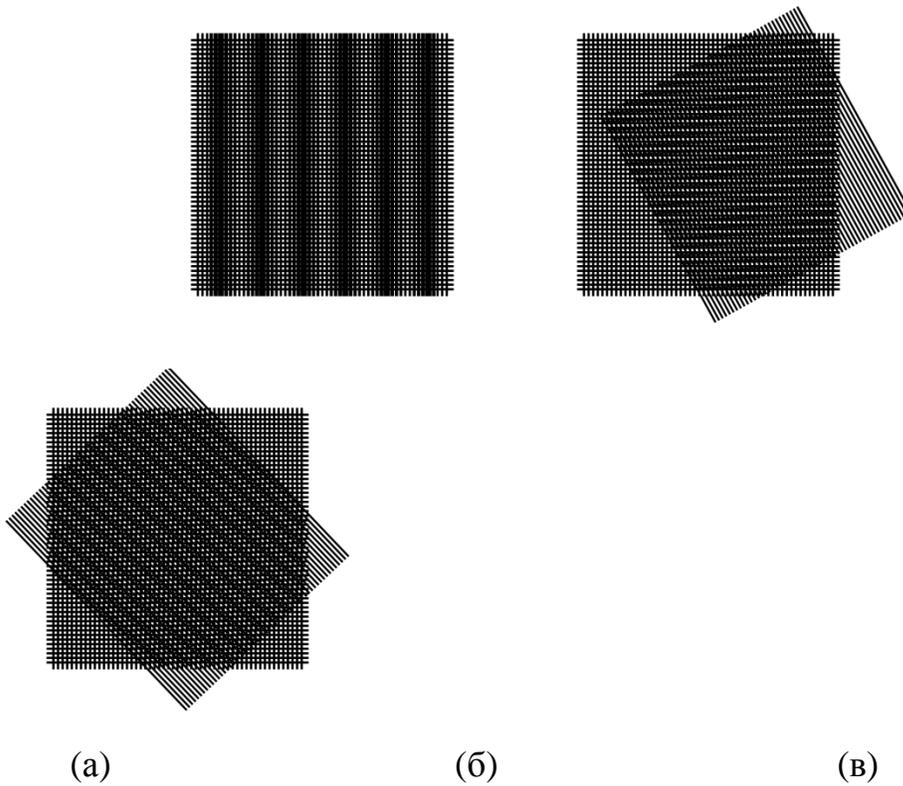


Рис. 51. Муаровские узоры, наблюдаемые в эксперименте при $\rho = 1.1$ на углах $0, 27^\circ$ и 45° .

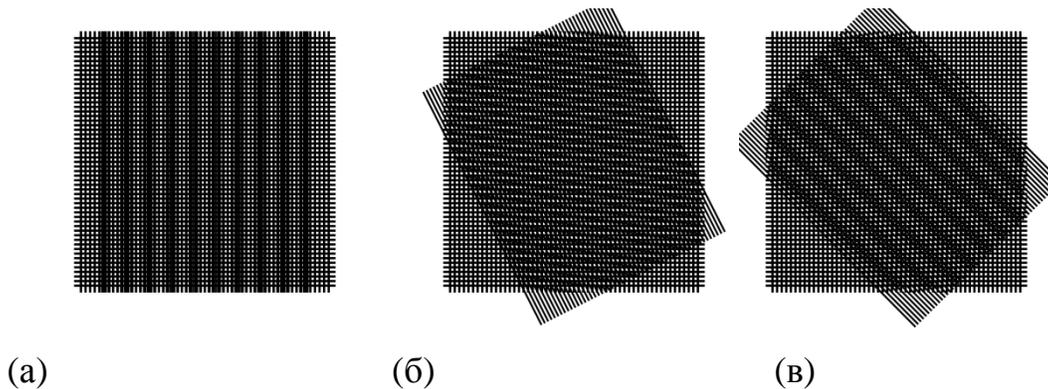


Рис. 52. Муаровские узоры, наблюдаемые в эксперименте при $\rho = 1.2$ на углах 0 , 27° и 45° .

Поскольку указанные муаровские волны на угле 27° ($\rho = 1.1$, $\rho = 1.2$) обусловлены второй гармоникой, их амплитуда (и поэтому визуальный контраст) заметно ниже, чем муаровских волн на углах 0° и 45° (обе обусловлены первой, синусоидальной компонентой). Самая сильная первая гармоника может быть видна еще и на других углах, но уже с более коротким периодом; см. рис. 51(б).

В реальных ЖК дисплеях можно наблюдать муаровские волны, обусловленные 4-й (иногда 5-й) гармоникой. Количество анализируемых траекторий – квадрат числа компонент, и общее количество получается в два раза больше, чем в синусоидальном случае. Чтобы включить в моделирование более высокие компоненты во все режимы, мы в настоящее время улучшаем эффективность вычислений.

Высшие гармоники, в частности, проявляются в дискретных муаровских углах. Чтобы экспериментально определить эти углы, мы провели серию экспериментов [124] с напечатанными образцами (с использованием лазерного принтера) и ЖК панелями. В сочетании с этими панелями и образцами в этих экспериментах были использованы пластины параллаксного барьера. Диапазон изменения угла α зависит от симметрии, и в общем случае составляет $0 - 90^\circ$, но $0 - 45^\circ$ для квадратных ячеек. Свойства симметрии спектральных траекторий рассмотрены в работе [174]. Расстояние наблюдения и диапазон геометрических параметров ρ и σ от 0,18 до 3 соответствуют типичному стереоскопическому дисплею или многокурсному дисплею, использующему субпикселы. Конечно, визуальное проявление муара в каждом конкретном случае зависит от точных

значений параметров α , ρ и σ . Однако в предварительных экспериментах мы не заметили их влияния на кластеризацию – основной эффект данного раздела. Всего в экспериментах использовалось 5 ЖК панелей (с фиксированным значением σ) и разнообразные напечатанные образцы (в широком диапазоне σ) вместе с 3 барьерными пластинами в различных сочетаниях.

Угол α между неподвижным изображением (напечатанным или панелью) и барьерной пластиной постепенно менялся от 0 до 90°. При повороте пластины определялись и записывались углы φ , при которых имеется эффект муара. Визуальное наблюдение производилось с расстояния 50 см. Таким способом определялись углы видимого эффекта муара (муаровские углы φ).

Был выполнен эксперимент с произвольным, в том числе рациональным

$$\sigma_{kl} = \frac{k}{l} \quad (k, l \text{ целые числа}) \quad (64)$$

соотношением сторон (напечатанные образцы). Использовать рациональные углы для определения углов эффекта муара было предложено в [174]. В экспериментах с напечатанными образцами соотношения сторон σ было от 0,17 до 3,0, а отношение размеров ρ – от 0,18 до 0,72; в экспериментах в ЖК панелями $\sigma = 1$, ρ – от 1,62 до 3,0.

Муаровские углы $\varphi = 0$ и 90° наблюдались в каждом измерении при любой комбинации параметров σ и ρ между 0.18 и 3.

В экспериментах с произвольным соотношением сторон (напечатанные образцы) было замечено, что муаровский угол φ меняется постепенно при постепенном изменении соотношения сторон.

В экспериментальных данных $\tan(\varphi)$ в зависимости от σ , представленных на рис. 53, можно распознать, по крайней мере, 3 прямых

линии под углами $\varphi = 0, 45^\circ$ и 90° . Внимательный взгляд на рис. 53 дополнительно вскрывает кластеризацию экспериментальных точек в узких пределах около других лучей с рациональными углами наклона. Такие лучи вместе с их окрестностью охватывают подавляющее большинство экспериментальных данных.

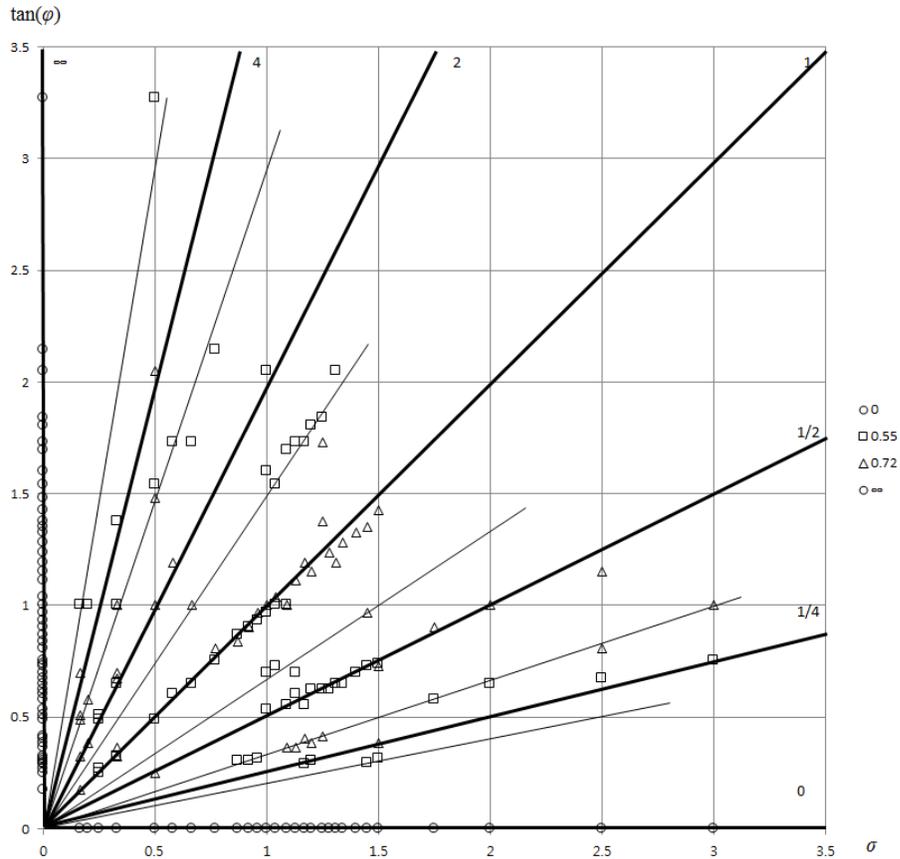


Рис. 53. Экспериментальные данные для напечатанных образцов.

Тангенс муаровского угла φ как функция соотношения сторон σ при $\rho = 0.55$ и 0.72 (квадратные и треугольные метки). У некоторых лучей указан угол наклона.

Нормализованное среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от соответствующих лучей составляет 1,7%. Такие же результаты получены с квадратными пикселями ЖК панелей. Это означает, что вообще

говоря, тангенс муаровского угла φ пропорционален соотношению сторон. Этот факт исключает существование некоторого специального соотношения сторон, предпочтительного для минимизации эффекта муара. Однако в принципе области между лучами могут быть использованы для минимизации.

Подмножество экспериментальных данных с отдельными значениями k и l графически представляет из себя вертикальные сечения рис. 53 на фиксированных значениях σ . Экспериментально было обнаружено, что картина расположения данных с рациональными абсциссами при малых значениях k, l отличается от общей картины, представленной выше.

Для проверки этого из полного набора данных было выбраны 8 рациональных соотношений сторон с $k, l \leq 4$ (именно, $1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 1, 3/2, 2,$ и 3). Форма таких ячеек включает квадрат и квадрат, разделенный на несколько равных частей, как в типичных ЖК дисплеях. При практически равномерно распределенных абсциссах экспериментальных точек, большинство их ординат сконцентрировано около небольшого числа значений. Эти ординаты можно распределить по 10 категориям (группам) так, чтобы среднеквадратичное отклонение от центра каждой группы было меньше 5%. В результате установлено, что центры таких групп близки к рациональным числам.

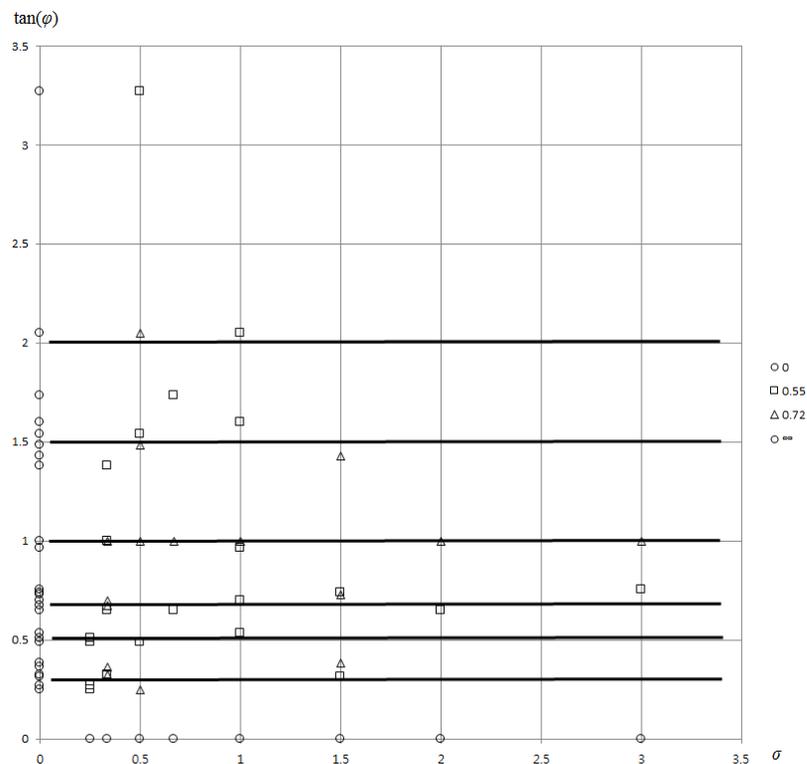


Рис. 54. Дискретные муаровские углы, определенные экспериментально. Кластеризация экспериментальных данных с «небольшими рациональными» соотношениями сторон.

Для соотношений сторон, выражаемых рациональными числами с малыми значениями k и l , в измерениях отмечено лишь несколько муаровских углов, тангенсы которых рациональны. Такую характерную черту можно трактовать как дискретные муаровские углы у решёток ячейками, представляющими собой части квадрата. Это означает, в частности, что практически все углы эффекта муара в квадратных ячейках, являются теми же, что и в ячейках разделенных вертикально на 2 или 3 равных части, что может иметь определенное значение для практических применений.

Дискретность муаровских углов φ экспериментально наблюдалась также и в ЖК панелях (квадратные пиксели с $\sigma = 1$) для всех комбинаций

панелей (4 типа) и барьерных пластин (3 типа). Как и в эксперименте с рациональным соотношением сторон у печатных образцов, муаровские углы φ у квадратных пикселей ЖК панелей очень близки к углам с рациональными тангенсами 0, 1/3, 1/2, 2/3, и 1 (в экспериментах среднеквадратичное отклонение тангенсов наблюдаемых углов от этих рациональных чисел составляет 2,5%).

Таким образом, большинство муаровских углов φ , обнаруженных экспериментально для $k, l \leq 4$, являются рациональными углами

$$\varphi_{mn} = \arctan\left(\frac{m}{n}\right) \quad (m \text{ и } n - \text{целые числа } \leq 4) \quad (65)$$

Далее обнаружено, что среди всех муаровских углов φ_{mn} в рациональных ячейках со значениями $1 \leq k, l \leq 6$, на отдельных углах эффект муара происходит заметно чаще, чем на других. Там он происходит почти всегда, а на других углах практически не встречается.

Такая классификация может дать ключ к определению углов, предпочтительных для минимизации эффекта муара в дисплеях. Соответственно, рациональные углы с $m, n > 4$ – хорошие кандидаты на те углы, где эффект муара встречается исключительно редко. К примеру, конкретный список тангенсов рациональных углов $4 < m, n < 7$ выглядит следующим образом: 1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 1/6, 5/6 (углы, которые можно сократить к меньшим m, n , в список не включены). В практической минимизации эти углы следует проверять в первую очередь.

3.6. Принцип построения оптической системы для формирования 3D изображений на основе эффекта муара

В предложенном автором двумерном муаровском дисплее [175] изображение строится из специальным образом сформированных муаровских

узоров. Муаровскими узорами можно управлять разными способами. При этом надо учесть, что для параллельных решёток [175], фазы муаровской волны и смещенной решетки равны:

$$\frac{x_m}{\lambda_m} = \frac{x_1}{\lambda_1} \quad (66)$$

где x_1 и x_m – смещения решётки и муаровских узоров, а λ_1 и λ_m – соответствующие периоды. Из (66) легко увидеть, что смещение решетки на полпериода приводит к противоположной фазе муаровских узоров. Наложение решеток дает широкий муаровский узор по всей площади полезного изображения при его отсутствии за пределами этой площади. В экспериментах решётки печатались лазерным принтером на бумаге и на прозрачной пленке.

Подобно смещению, для управления муаровским изображением можно использовать угол и период. Все три способа управления представлены в работе о двумерном муаровском дисплее [175].

Теперь опишем кратко, как можно сформировать 3D изображение при помощи эффекта муара [176]. Теоретической основой метода формирования 3D изображения на основе эффекта муара является работа [123], в которой найдены соотношения между смещением наблюдателя и смещением видимых муаровских узоров. В случае слоёв с ненулевым зазором каждый глаз наблюдателя видит разное изображение муаровских узоров. Основываясь на этом, представляется возможным направить различные изображения к левому и правому глазу независимо и, тем самым, построить автостереоскопический дисплей. В этом отношении полезно уточнить характеристики муаровских узоров, которые делают их независимыми по разным направлениям.

Предположение автора о том, что муаровские узоры с более коротким периодом видны слабее [103], можно перефразировать так: период

муаровских узоров характеризует степень взаимодействия решёток. По известной [70] формуле (1), период муаровских узоров от одинаковых линейных решёток находится в инверсном отношении к $\sin \alpha/2$, где α – угол между решётками, и минимален при угле 90° , т.е. для ортогональных решёток. Другими словами, взаимодействие между ортогональными решётками минимально.

В таких обстоятельствах правый глаз видит некоторое изображение, а левый не видит его, и наоборот, как показано на рис. 55. Для левого и правого изображений автор использует решетки под углами $\pm 45^\circ$.

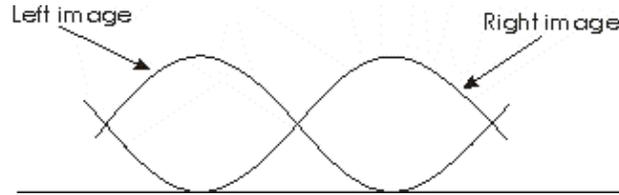


Рис. 55. Муаровские изображения для левого и правого глаза.

Фазы независимых левого и правого муаровских изображений противоположны, иначе говоря, смещение муаровских узоров x_m равно половине их длины волны λ_m :

$$x_m = \frac{1}{2} \lambda_m \quad (67)$$

Подставляя формулы для смещения (55) и длины волны (56) из работы автора [123] в условие половины длины волны (67), можно получить (в случае $s > \rho$)

$$\lambda_2 = 2d_i(s-1) \quad (68)$$

где d_i – межзрачковое расстояние. С учётом определения параметра s (57), уравнение (68) можно переписать:

$$\lambda = 2d_i \frac{d}{z} \quad (69)$$

Это соотношение используется для нахождения периода решёток для любых заданных расстояния z и зазора d (среднее межзрачковое расстояние считается известной константой [177]).

В экспериментах использовались решётки с одинаковым периодом $\lambda_1 = \lambda_2$ и $\rho = 1$. Из (69) можно найти в частности, что при расстоянии наблюдения 68 см и зазоре 6 мм, требуемый период решёток составляет 1,05 мм. Общая компонента печаталась на прозрачной пленке, а заменяемая – на бумаге. На обоих решётках линии $+45^\circ$ составляют правое изображений, а линии -45° – левое.

Когда плоскости решёток отделены зазором и собранная структура рассматривается с предусмотренного расстояния, становится возможным стереоскопическое восприятие изображения. В наблюдаемых изображениях был отчетливо заметен параллакс между левым и правым изображениями, что требуется для бинокулярного восприятия. Диспаратность наблюдаемых букв соответствует диспаратности синтезированных изображений. Это и означает автостереоскопический дисплей.

Выводы к главе 3

В этой главе методами математического моделирования получены следующие результаты: прямая минимизация эффекта муара, спектральные траектории, влияние конечного расстояния. Важность минимизации эффекта муара в автостереоскопических дисплеях была отмечена автором в 2003 г., по-видимому, впервые в литературе. Для минимизации эффекта муара автором в диссертации разработаны два подхода: первый – прямой аналитический, второй – наглядный геометрический. Решена программная

проблема полуавтоматического измерения параметров плоских муаровских волн.

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 спектральных траекторий в комплексной плоскости, что дает возможность проведения комплексного исследования с учётом конечного расстояния, обеспечивающего повышение качества автостереоскопических изображений.

Система моделирования эффекта муара работает в обзорном и детальном режиме; она предоставляет пользователю как общую картину траекторий, так и конкретное визуальное проявление эффекта муара, а также распознает в изображениях плоские волны с целью полуавтоматического измерения их численных характеристик. Результаты компьютерного моделирования подтверждены в физических и вычислительных экспериментах при вариации параметров (положение наблюдателя по двум координатам, зазор и угол установки лентичулярной линзы).

Компьютерное моделирование и физический эксперимент подтверждают теорию для более высоких гармоник. Результаты моделирования соответствуют теории для различных сочетаний параметров. Типичная среднеквадратичная разница между экспериментом и теорией составляет 3 - 5%. В любом случае, средство моделирования предоставляет возможность прямого подтверждения обзорного моделирования путем вычисления преобразования Фурье. В моделировании параметры

результатирующих муаровских волн измеряются полуавтоматически. Средство моделирования управляется интерактивно. Продвинутой теория в сопровождении обновленного средства моделирования (до 3 спектральных компонент в каждой решётке) обеспечивает минимизацию для расширенного ограниченного спектра.

Экспериментально определены углы муаровского эффекта. Чтобы определить существование возможных предпочтительных значений геометрических параметров, были проведены эксперименты.

На эффект муара проверялись углы $0 - 90^\circ$. Эксперименты с печатными образцами были проведены при ρ от 0,18 до 0,72, σ от 1/6 до 3; в экспериментах с ЖК панелями ρ изменялось от 1.62 до 3.00, $\sigma = 1$. Вся область параметров покрывает ρ от 0.18 до 8.89, σ от 1/6 до 3. Такие параметры типичны для многокурсных и интегральных дисплеев.

Предложен новый тип автостереоскопического дисплея. Визуальное изображение строится из искусственно сформированных муаровских узоров. Собственно говоря, это новая концепция формирования 3D изображений. Автором представлена первая реализация устройства, в которой стереоскопическое изображение наблюдалось в ортогональных решётках, установленных под углами $\pm 45^\circ$.

Заключение

Для объёмного дисплея волнометрического типа разработан метод последовательного послойного синтеза 3D изображения в реальном времени, созданы программные средства управления и тестирования и компьютерные программы для вычислительного эксперимента с использованием макета объёмного дисплея, при этом реализовано две версии средств формирования 3D изображения: первая (компилятор) – с предварительной обработкой графической информации и непосредственным доступом прикладной программы к устройству, вторая (интерпретатор) – с обработкой информации в реальном времени и доступом прикладной программы к устройству через драйвер, который обеспечивает взаимодействие операционной системы с аппаратурой дисплея.

В разработанных программных средствах реального времени используется полностью трёхмерная графика, в которой и пространство модели, и пространство изображения трёхмерны. Традиционная 3D компьютерная графика 90-х гг. фактически относится к воспроизведению пространственных объектов на плоскости, т.е. в такой компьютерной графике область изображения двумерна, а область объектов трёхмерна. А в разработанных программных средствах управления объёмным дисплеем волнометрического типа все действия с объектами, от их создания до воспроизведения, выполняются в трёхмерных пространствах. В этих средствах вычислительного эксперимента отсутствует необходимость определения видимости и выполнение проецирования. Эти функции естественным образом возлагаются на зрительный аппарат человека, а в дисплее формируется полное пространственное изображение объекта, которое можно рассматривать под различными углами без использования специальных визуальных средств.

Модифицированный автором алгоритм Брезенхама может быть почти автоматически расширен на случай N измерений, в отличие от предыдущего [132] и последующих [134], [133] трёхмерных аналогов алгоритма Брезенхама.

В диссертации описываются созданные автором новые методы формирования и обработки автостереоскопических многоракурсных изображений, включая способы оценки качества изображения по числу смешанных ракурсов, способ повоксельной генерации изображения, способ восстановления расположения объектов.

Представленная модель многоракурсного дисплея позволяет рассчитывать параметры дисплея, в том числе моделировать восприятие и оценить визуальное качество. Детальный анализ характера смешивания ракурсов в пространстве области наблюдения порождает определение «геометрического» качества изображения как обратной величины количества смешанных ракурсов.

Дисплейные устройства, работающие на основе описанного метода формирования, заявлены и запатентованы в нескольких странах (Российская Федерация, Республика Корея, США): [135], [178] - [180].

В экспериментальных дисплеях продемонстрировано синтезирование многоракурсных изображений с двумерным параллаксом, построенных новым методом. Кроме прямого использования в качестве структурных элементов многоракурсных изображений образцы вокселей могут найти и другие практические применения. В частности, заранее сгенерированные образцы маркеров могут быть также использованы в интерактивном общении с пользователем 3D дисплея, как в [181]. Их можно использовать в слежении за положением наблюдателя подобно [27], хотя и не по произвольным, а по дискретным положениям наблюдателя. Однако это облегчает процедуру

слежения, избавляя её от излишних вычислений. Кроме того, функции можно использовать при измерении расстояний подобно [182], [183]; при этом изображение каждой точки сравнивается с несколькими опорными функциями как с образцами.

Это даёт прочную основу для использования результатов диссертации в системах реального времени и в обработке многокурсовых изображений новыми способами.

Созданная теория минимизации эффекта муара в пространственной и спектральной областях вместе с системой компьютерного моделирования позволяют определить диапазон параметров автостереоскопического дисплея (таких как расстояние наблюдения, угол установки лентичулярной линзы), в котором эффект муара минимизируется.

Для практических дисплеев важна стабильность минимизации. С этой целью были выполнены исследования эффекта муара на конечном расстоянии при ненулевом зазоре между решётками, в отличие от классического подхода к эффекту муара. Показано, что и в этом случае эффект муара также может быть представлен спектральными траекториями в комплексной плоскости.

Теория минимизации эффекта муара и вытекающая из неё возможность создания дисплеев, лишенных муара, подтверждена моделированием и экспериментально. Выполнена аналитическая минимизация эффекта муара в синусоидальном случае. Подтверждена возможность геометрической минимизации эффекта муара в спектральной области с использованием спектральных траекторий. Рассмотрение траекторий в спектральной области создаёт прочную основу для минимизации муара в диапазоне параметров, что необходимо для автостереоскопических дисплеев. На практике минимизация подтверждена в экспериментальных устройствах. Расстояние наблюдения от 1 до 2 м.

Отдельное внимание уделено моделированию эффекта муара в 3D дисплеях, для чего создана система компьютерного моделирования. Она работает в двух режимах, обзорном и детальном, а также распознает в изображениях плоские волны с целью полуавтоматического измерения их численных характеристик.

Новый подход к минимизации эффекта муара в автостереоскопических дисплеях, предложенный автором, выглядит весьма в определённой степени перспективно, поскольку минимизация в нем выполняется в спектральной области, но вычисление спектров не требуется. С практической точки зрения такой подход предоставляет своеобразную быструю и наглядную графическую минимизацию.

Автором разработаны средства моделирования, управления и тестирования для всех рассматриваемых дисплеев и видов автостереоскопических изображений, в том числе программные средства для моделирования эффекту муара и для вычислительного эксперимента с использованием объёмного дисплея волюметрического типа. Стабильность минимизации подтверждена экспериментально [129] на разных углах наблюдения, см. рис. 56. Экспериментально и компьютерным моделированием подтверждена теория минимизации и выполнено комплексное исследование, что позволяет создавать многоракурсные автостереоскопические дисплеи повышенного качества, лишённые эффекта муара. Тем самым, разработанные средства способны обеспечить отсутствие визуальных проявлений этого эффекта в автостереоскопических 3D дисплеях, что было подтверждено в экспериментах.

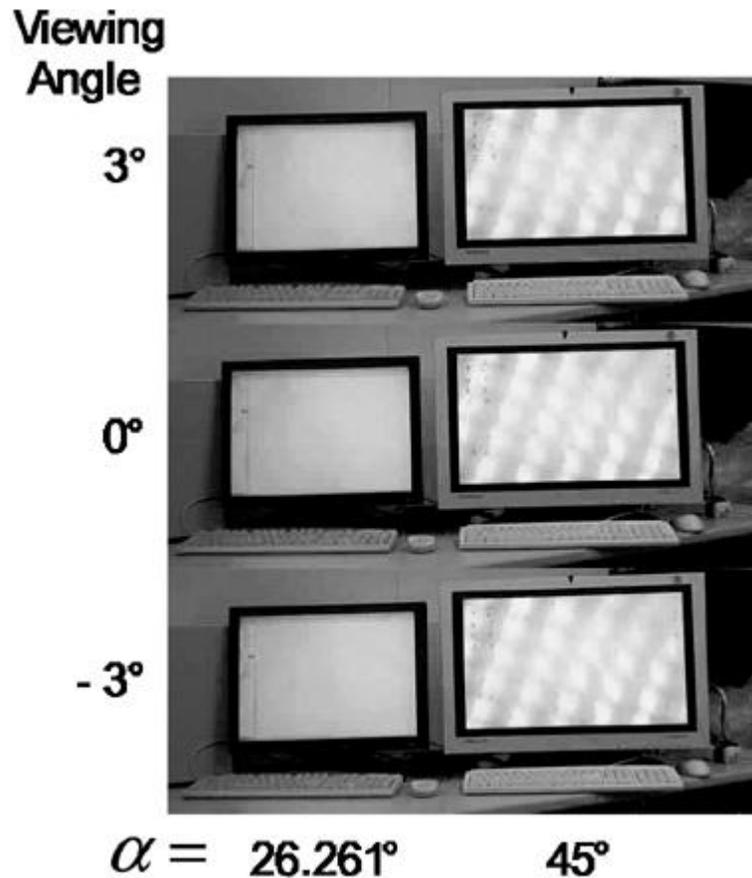


Рис. 56. Иллюстрация стабильности минимизации эффекта муара при изменении условий наблюдения. На фотографии видно смещение муаровских полос (справа, при произвольном угле) и их отсутствие (слева, при оптимальном угле)

В диссертации получены следующие **основные результаты**:

1) Решена задача формирования 3D изображений в реальном времени новым методом на основе последовательного послойного сканирования объёма при помощи высокоскоростной комбинированной акустооптической и электромеханической 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 объёмных изображений

волнометрического типа. Экспериментально доказана возможность отображения в трёхмерном пространстве объёмных сцен сложностью до нескольких тысяч рёбер на кадр при частоте регенерации 25 Гц.

2) На основе выявленных автором структурных элементов предложены образцы вокселей. Разработанные методы формирования и обработки многоракурсных изображений предложены автором впервые. Реализованные эффективные алгоритмы формирования и обработки многоракурсных изображений 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 теории минимизации эффекта муара разработан комплекс программ имитационного моделирования. Моделирование и минимизация выполняются с использованием спектральных траекторий в комплексной плоскости, что предложено и реализовано автором впервые. Построена система компьютерного моделирования и выполнено математическое моделирование эффекта муара с количеством решеток до 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 3D отображения на основе эффекта муара.

При работе над диссертацией решены важные научно-технические задачи по созданию и развитию новых методов формирования и обработки многоракурсных изображений, новых принципов построения систем отображения информации, разработке системы имитационного компьютерного моделирования эффекта муара и выполнении научных исследований с использованием математического компьютерного моделирования. Предложен новый принцип построения системы формирования 3D изображений, два метода формирования изображений с автоматическим перекрытием дальних объектов ближними, реализованы алгоритмы реального времени, создана теория минимизации эффекта муара, а также выполнена работа по оцениванию и повышению визуального качества в системах формирования 3D изображений.

Таким образом, 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 объёмных изображений волюметрического типа указывает один из путей построения 3D дисплеев с экранами небольших размеров, которые в последнее время пользуются увеличивающимся спросом. Теория минимизации эффекта муара и система компьютерного моделирования открывают новые возможности для стабильного улучшения визуального качества различных дисплеев, причём не только трёхмерных. Результаты комплексного исследования эффекта муара могут быть использованы для создания 3D изображений нового типа [175],

[176], основанных на эффекте муара – физическом принципе, ранее не использованном в системах отображения трёхмерной информации.

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. Пеню. Эксперименты по аналитическому подходу к минимизации ЭМ выполнены совместно с проф. Соном, а по спектральному - с д-ром Кимом (Kim Sung-Кyu), вместе с которым также поставлены и проведены эксперименты по ЭМ с ненулевым зазором. Кроме того, автор приносит глубокую благодарность научному консультанту доктору технических наук профессору П.Е.Твердохлебу – за очень плодотворные обсуждения и поддержку в работе, к.т.н. Е.Ф. Пеню за плодотворную совместную работу, д.т.н. И.Г. Пальчиковой и д.ф.-м.н. Л.Л. Фрумину за чрезвычайно полезные дискуссии, ценные советы и замечания, сделанные при чтении рукописи диссертации, а также сотрудникам лаборатории оптических информационных систем к.т.н. Ю.А. Щепёткину и к.т.н. А.В. Трубецкому, принимавшим участие в выполнении отдельных этапов работы.

Список литературы

1. C. Hsieh, 3D Display Technology and Market Forecast Report, http://www.displaysearch.com/cps/rde/xchg/displaysearch/hs.xsl/3d_display_technology_market_forecast_report.asp
2. Putilin A., Gustomiasov I., Chernopiatov A. Application of waveguide holograms in displays and planar illuminators // Proc. XII International Symposium Advanced Display Technologies. – 2003. – pp. 143-147
3. Dogdson N.A. Autostereoscopic 3D displays // Computer. – 2005. – vol. 38. – No 31. – pp. 31-36
4. Lueder E. 3D Displays / New York, John Willes and Sons. – 2012. – 264 p.
5. Blundell B.G., Schwarz A.J. Creative 3-D Display and Interaction Interfaces: A Transdisciplinary Approach / New York, John Willey & Sons. – 2007. – 371 p.
6. 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
7. 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
8. 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
9. 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
10. 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.
11. Blundell B.G., Schwarz A.J. Volumetric Three-Dimensional Display Systems / New York, John Willey & Sons. – 2000. – 330 p.
12. Вовк Ю.В., Выдрин Л.В., Твердохлеб П.Е., Трубецкой А.В., Щепёткин Ю.А., Штейнберг И.Ш. Лазерная система для формирования трехмерных изображений в реальном времени // Автометрия. – 1997. – № 2. – С. 3-10
13. Solomon D. Volumetric imaging launches graphics into a 3-D world // Photonics Spectra. – 1993. – vol. 27. – No 6. – p. 129
14. Saveljev V.V., Tverdokhle P.E., Trubetskoi A.V., and Shchepetkin Yu.A. Laser system for real-time visualization of three-dimensional objects // Proc. SPIE. – 1998. – vol. 3402. – pp. 222 - 224
15. Савельев В.В., Твердохлеб П.Е., Трубецкой А.В., Щепёткин Ю.А. Формирование трехмерных изображений с помощью каскадного высокоскоростного

- акустооптического дефлектора // Автометрия. 1997. – № 2. – С. 11 - 14
16. Bahr D., Langhans K., Gerken M., Vogt C., Bezecny D., Homann D. FELIX: a volumetric 3D laser display // Proc. SPIE. – 1996. – vol. 2650. – pp. 265-273
 17. Lasher M.E., Soltan P., Dahlke W.J., Acantilado N.P., McDonald M. Laser-projected 3D volumetric displays // Proc. SPIE . – 1996 . – vol. 2650. – pp. 285-295
 18. Kompanets I. N., Gonchukov S.A. Volumetric displays // Proc. SPIE. –2005. – vol. 5821. – pp. 125-136
 19. Kompanets I.N. Advances and tendencies in the development of display technologies // Proc. SPIE. – 2006. – vol. 6344. – p. 63441W-1
 20. Andreev A., Bobylev Yu., Kompanets I., Pozhidaev E., Shoshin V., Shumkina Yu., Torgova S. Experimental Model of 3D Volumetric Display Based on a Stack of FLC Light-Scattering Shutters // Proc. SPIE. – 2007. – vol. 6637. – p. 66370Q-1
 21. Kim E.-S. Three-dimensional projection display // Digital Holography and Three-Dimensional Display. Principles and Applications / T.-C. Poon, ed. – New York, Springer. – 2006. – pp. 293-332
 22. Suyama S., Takada H., Uehira K., Sakai S., Ohtsuka S. A Novel Direct-Vision 3-D Display Using Luminance-Modulated Two 2-D Images Displayed at Different Depths // SID Symposium Digest of Technical Papers. – 2000. – vol. 31. – No 1. – pp. 1208–1211
 23. Suyama S., Takada H., Uehira K., Sakai S., Ohtsuka S. A New Method for Protruding Apparent 3-D Images in the DFD (Depth-Fused 3-D) Display // SID Symposium Digest of Technical Papers. – 2001. – vol. 32. – No 1. – pp. 1300–1303
 24. Kim Y., Hong K., Lee B. Recent researches based on integral imaging display method // 3D Research. – 2009. – vol. 1. – p. 010102
 25. Park J.-H., Hong K., Lee B. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging // Applied Optics. – 2009. – vol. 48. – No 34. – pp. H77-H94
 26. Lee B.-R., Hwang J.-J., Son J.-Y. Characteristics of composite images in multiview imaging and integral photography // Applied Optics. – 2012. – vol. 51. – No 21. – pp. 5236-5243
 27. Park G., Hong J., Kim Y., Lee B. Enhancement of viewing angle and viewing distance in integral imaging by head tracking // Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest. – 2009. – p. DWB27
 28. Kim S.-K., Yoon K.-H. Dynamic viewing zone reformation generated by 3D optical line in multiview 3D display // Proc. 12th Workshop on Information Optics (WIO). – 2013. – pp. 1-2
 29. Halle M. Autostereoscopic Displays and Computer Graphics // Computer Graphics. – 1997. – vol. 31. – pp. 58-62
 30. Woodgate G.J., Harrold J. Key Design Issues for Autostereoscopic 2-D/3-D Displays // Proc. EuroDisplay. – 2005. – pp. 24-27

31. Kubota A., Smolic A., Magnor M., Tanimoto M., Chen T., Zhang C. Multiview Imaging 3DTV // IEEE Signal Processing. – 2007. – vol. 24. – pp. 10-21
32. Onural L., Sikora T., Ostermann J., Smolic A., Civanlar M.R., Watson J. // Proc. National Association of Broadcasters Broadcast Engineering Conference (NAB BEC). – 2006. – p. 456-467
33. Börner R. Autostereoskopische 3DTV nach dem Linsenrasterverfahren // Fernseh- und Kinotechnik (FKT). – 1991. – vol. 45. – No 9. – p. 453-455
34. Isono H., Yasuda M., Sasazawa H. Autostereoscopic 3D LCD display using LCD-generated Parallax barrier // Proc. 12th International Display Research Conference (Japan Display'92). – 1992. – pp. 303-306
35. Isono H., Yasuda M., Takemori D., Kanayama H., Yasuda C., Chiba K. 50-inch autostereoscopic full-color 3D TV display system // Proc. SPIE. – 1992. – vol. 1669. – pp. 176-185
36. Eichenlaub J., Hollands D., Hutchins J. Prototype flat panel hologram-like display that produces multiple perspective views at full resolution // Proc. SPIE. – 1995. – vol. 2409. – pp. 102-112
37. Bader G., Lueder E., Fuhrmann J. An autostereoscopic real-time 3D display system // Proc. Euro Display SID. – 1996. – pp. 101-104
38. Okano F., Hoshino H., Yuyama I. Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography // Applied Optics. – 1997. – vol. 36. – pp. 1598-1603
39. Liao H., Iwahara M., Hata N., Dohi T. High-quality integral videography using a multiprojector // Optics Express. – 2004. – vol. 12. – No 6. – pp. 1067-1076
40. Erdmann L., Gabriel K.J. High-Resolution Digital Integral Photography by use of a Scanning Microlens Array // Applied Optics. – 2001. – vol. 40. – No 31. – pp. 5592-5599
41. Ives H.E. Optical properties of a Lippman lenticulated sheet // Journal of the Optical Society of America. – 1931. – vol. 21. – pp. 171-176
42. Burckhardt C.B. Optimum Parameters and Resolution Limitation of Integral Photography // Journal of the Optical Society of America. – 1968. – vol. 58. – No 1. – pp. 71-74
43. Okoshi T. Three-dimensional Imaging Techniques / New York, Academic Press. – 1976 – 403 p.
44. Wu C.H., Aggoun A., McCormick M., Kung S.Y. Depth extraction from unidirectional integral image using a modified multibaseline technique // Proc. SPIE. – 2002. – vol. 4660. – pp. 135-145
45. Ren J., Aggoun A., McCormick M. Computer Generation of Integral 3D Images with Maximum Effective Viewing Zone // Proc. SPIE. – 2003. – vol. 5006. – pp. 65-73
46. Javidi B., Frauel Y. Three-dimensional object visualization and recognition based on computational integral imaging // Proc. SPIE. – 2003. – vol. 5106. – p. 22-29
47. Stern A., Javidi B. Three dimensional sensing, visualization, and processing using integral imaging // Proc. IEEE. – 2006. – vol. 94. – No 3. – p. 591-607

48. 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
49. 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
50. Jang J.-S., Javidi B. Very-Large Scale Integral Imaging (VLSII) for 3D Display // Optical Engineering. – 2005. – vol. 44. – No 1. – pp. 01400-1 - 141010-6
51. Shin D.-H., Lee B., Kim E.-S. Improved viewing quality of 3-D images in computational integral imaging reconstruction based on lenslet array model // ETRI Journal. – 2006. – vol. 28. – No 4. – pp. 521-524
52. Shan J., Fu C.-S., Li B., Bethel J., Kretsch J., Mikhail E. Autostereoscopic visualization and measurement: principles and evaluation // Proc. 20th International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress. – 2004. – p. 626.
53. Manolache S., Aggoun A., McCormick M., Davies N. Analytical model of a three-dimensional integral image recording system that uses circular- and hexagonal-based spherical surface microlenses // Journal of the Optical Society of America A. – 2001. – vol. 18. – No 8. – pp. 1814-1821
54. Bi J., Zeng D., Zhang Z., Dong Z. Automultiscopic 3D Displays System Model and Evaluation // Proc. World Congress on Computer Science and Information Engineering. – 2009. – vol. 6. – pp. 514-518
55. Kim J., Kim Y., Choi H., Cho S.-W., Lee B. Analysis on the depth and angular resolution of multi-view display // Proc. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim). – 2007. – p. ThP_104
56. Baasantseren G., Park J.-H., Kim N. Viewing angle analysis for wide-viewing angle multi-layer integral imaging display // Proc. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim). – 2009. – p. ThJ1_2
57. Shin D.-H., Kim N.-W., Yoo H., Lee J.-J., Lee B.-H., Kim E.-S. Improved viewing quality of 3-D images in computational integral imaging reconstruction Based on Round Mapping Model // ETRI Journal. – 2007. – vol. 29. – No 5. – pp. 649-654
58. Wang Z., Bovik A., Modern Image Quality Assessment. New York : Morgan & Claypool, 2006. 144 p.
59. Lee H., Shon Y.-S., Kim S.-K., Shon K.-H. Projection type multi-view 3D display system with controllable crosstalk in a varying observing distance // Proc. 12th Workshop on Information Optics (WIO). – 2013. – pp. 1-2
60. Lee C., Seo G., Lee J., Han T.-H., Park J.G. Auto-stereoscopic 3D displays with reduced crosstalk // Optics Express. – 2011. – vol. 19. – No 24. – pp. 24762-24774
61. Lee K.-H., Park Y., Lee H., Yoon S.K., Kim S.-K. Crosstalk reduction in auto-stereoscopic projection 3D display system // Optics Express. 2012. – vol. 20. – No 18. – pp. 19757-19768

62. Boher P., Leroux T., Bignon T., Collomb-Patton V. A new way to characterize autostereoscopic 3D displays using Fourier optics instrument // Proc. SPIE. – 2009. – vol. 7237. – p. 72370Z-1
63. Kim D., Min D., Oh J., Jeon S., Sohn K. Depth map quality metric for three-dimensional video // Proc. SPIE. – 2009. – vol. 7237. – p. 723719-1
64. Heynderickx I., Kaptein R. Perception of detail in 3D images. // Proc. SPIE. – 2009. – vol. 7242. – p. 72420W-1
65. Horikoshi T. Stereoscopic Viewing Space Analysis for Multi-View 3D Displays // Proc. 13th International Meeting on Information Display. – 2013. – p. 39-2
66. Son J.-Y., Saveljev V., Kim K.-T., Park M.-C., Kim S.-K. Comparisons of perceived image in multiview and integral photography based three-dimensional imaging systems // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – vol. 46. – No 3A. – pp. 1057-1059
67. Son J.-Y., Saveljev V.V., Choi Y.-J., Kim S.-K. Quality quantification of multiview three dimensional image // Proc. 9th International Display Workshop (IDW). – 2002. – pp. 1225-1228
68. Saveljev V.V., Son J.-Y., Cha K.-H. Estimation of image quality in autostereoscopic display // Proc. SPIE. – 2005. – vol. 5908. – p. 590807-1
69. 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 // Proc. SPIE. – 2009. – vol. 7329. – p. 73290O
70. Amidror I. The Theory of the Moiré Phenomenon, Volume I: Periodic Layers / London, Springer. – 2009. – 529 p.
71. Patorski K., Kujawinska M. Handbook of the Moiré Fringe Technique / Elsevier Science. – 1993. – 432 p.
72. Creath K., Wyant J.C. Moiré and fringe projection techniques // Optical Shop Testing. – John Wiley & Sons, New York. – 1995. – pp. 653-685
73. Shiramatsu N., Tanigawa M., Iwata S. Practical method for evaluating the visibility of moiré patterns for CRT design // Proc. SPIE. – 1995. – vol. 2408. – p. 255
74. Joo B.-Y., Shin D.-H. Simulations of pixel moirés in the liquid crystal display with image processing technique // Displays. – 2009. – vol. 30. – pp. 190-194
75. Kim Y., Park G., Cho S.-W., Jung J.-H., Lee B., Choi Y., Lee M.-G. Integral imaging with reduced color moiré pattern by using a slanted lens array // Proc. SPIE. – 2008. – vol. 6803. – p. 68031L
76. Kim K.-B., Park H.-H., Kwon O., Kim M., Lee K.-Y., Park Y., Choi J.-H., Yu C.-H., Kim H.-D., Kim S. C., Chung H.-K. Investigation of Pattern-Induced Brightness Non-uniformity in Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode Displays // Japanese Journal of Applied Physics. – 2008. – vol. 47. – pp. 193-196.
77. Yoon J.-W., Park Y.-G., Park C.-J., Kim D.-I., Lee J.-H., Chung N.-K., Choe B.-Y., Suh T.-S., Lee H.-K. Reduction of a grid moiré pattern by integrating a carbon-interspaced high precision x-ray grid with a digital radiographic detector // Medical Physics. –

2007. – vol. 34. – p. 4092-7
78. Son J.-Y., Saveljev V.V., Choi Y.-J., Bahn J.-E. Full parallax image generation // Proc. SPIE. – 2002. – vol. 4660. – pp. 116-122
 79. Stockmann M., Naumann J. Moiré interferometry - Technique and Application // Anyagvizsgalok Lapja (Hungary). – 2005. – vol. 1. – pp. 3-4
 80. Kujawinska M., Salbut L. Automated moiré interferometry for residual stress determination in engineering objects // Handbook of moiré measurement / ed. By Walker C.A. – IOP Publishing. – 2004. –ch. 8.1. – p. 271
 81. Bartl J., Fira R., Hain M. Inspection of surface by the moiré method // Measurement Science review. – 2001. – vol. 1. – No 1. – pp. 29-32
 82. Hutley M.C., Hunt R., Stevens R.F., Savandert P. The moiré magnifier // Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A. – 1994. – vol. 3. – No 2. – pp. 133-142
 83. Zhou S., Fu Y., Tang X., Hu S., Chen W., Yang Y. Fourier-based analysis of moiré fringe patterns of superposed gratings in alignment of nanolithography // Optics Express. – 2008. – vol. 16. – No 11. – pp. 7869-7880
 84. dos Santos P.A.M. Moiré-like patterns as a spatial beat frequency in photorefractive sinusoidal phase gratings superposition // Optics Communications. – 2002. – vol. 212. – No 4-6. – pp. 211-216
 85. Hersch R.D., Chosson S. Band Moiré Images // ACM Transactions on Graphics. – 2004. – vol. 23. – No 3. – pp. 239-248
 86. Abolhassani M. Pixel size determination of a monitor using moiré fringe // Optical Engineering. – 2010. – vol. 49. – No 3. – p. 033608
 87. Chen W., Yan W., Hu S., Yang Y., Zhou S. Extended dual-grating alignment method for optical projection lithography // Applied Optics. – 2010. – vol. 49. – No 4. – pp. 708-713
 88. de Oliveira G.N., de Oliveira M.E., dos Santos P.A.M. Dynamic moiré patterns for profilometry applications // Journal of Physics: Conference Series. – 2011. – vol. 274. – p. 012036
 89. Balasubramanian R., Eschbach R. Reducing multi-separation color moiré by a variable undercolor removal and gray component replacement strategy // Journal of Imaging Science and Technology. – 2001. – vol. 45. – No 2. – pp. 152-160
 90. Blatner D., Chaves C., Fleishman G., Roth S. Real World Scanning and Halftones, 3-rd ed. // Berkeley, CA : Peachpit, 2004. pp. 294-297
 91. Bell G., Craig R., Simmiss T. Moiré interference in multilayered displays // Journal of Society of Informational Display. – 2007. – vol. 15. – No 11. – pp. 883-888
 92. Son J.-Y., Saveljev V.V., Choi Y.-J., Bahn J.-E., Choi H.-H. Parameters for designing autostereoscopic imaging systems based on lenticular, parallax barrier and IP plates // Optical Engineering. – 2003. – vol. 42. – No 11. – pp. 3326-3333
 93. Zhu Y., Zhen T. 3D multi-view autostereoscopic display and its key technologie // Proc.

- Asia-Pacific Conference on Information Processing. – 2009. – pp. 31-35
94. Vargady L.O. Moiré fringes as visual position indicators // *Applied Optics*. – 1964. – vol. 3. – No 5. – pp. 631-636
 95. Kim Y., Park G., Jung J.-H., Kim J., Lee B. Color moiré pattern simulation and analysis in threedimensional integral imaging for finding the moiré-reduced tilted angle of a lens array // *Applied Optics*. – 2009. – vol. 48. – No 11. – pp. 2178-2187
 96. Kong L., Jin G., Wang T. // Analysis of Moiré minimization in autostereoscopic parallax displays // *Optics Express*. – 2013. – vol. 21. – p. 26086
 97. Screen systems for multicolor printing : ПАТЕНТ No 4 537 470 СИИА / Schoppmeyer J. – 1985
 98. Uehara S., Hiroya T., Shigemura K., Asada H. Reduction and Measurement of 3D Moiré Caused by Lenticular Sheet and Backlight // *SID Symposium Digest of Technical Papers*. – 2009. – pp. 432-435
 99. Son J.-Y., Saveljev V., Shin S.-H., Choi Y.-J., Kim S.-S. Moiré Pattern reduction in Full-Parallax Autostereoscopic Imaging Systems Using two crossed Lenticular plates as a viewing zone forming optics // *Proc.10th International Display Research Workshops (IDW'03)*. – 2003. – pp. 1401-1404
 100. Son J.-Y., Saveljev V., Kim K.-T., Kim S.-S. Minimizing Moiré Fringes in Contact-Type 3-Dimensional Imaging Systems // *Proc., 17th Annual Meeting of the IEEE Laser & Electro-Optics Society (LEOS)*. – 2004. – pp. 350-351
 101. Okui M., Kobayashi M., Arai J., Okano F. Moiré fringe reduction by optical filters in integral three-dimensional imaging on a color flat-panel display // *Applied Optics*. – 2005. – vol. 44. – pp. 4475- 4483
 102. Jang J.-S., Javidi B. Two-step integral imaging for orthoscopic three-dimensional imaging with improved viewing resolution // *Optical Engineering*. – 2002. – vol. 41. – No 10. – pp. 2568-2571
 103. 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
 104. Takaki Y., Yokoyama O., Hamagishi G. Flat panel display with slanted pixel arrangement for 16-view display // *Proc. SPIE*. – 2009. – vol. 7237. – p. 723708-1
 105. Chen C.-H., Yeh Y.-C., Shieh H.-P.D. 3-D mobile display based on moiré-free dual directional backlight and driving scheme for image crosstalk reduction // *Journal of Display Technology*. – 2008. – vol. 4. – No 1. – pp. 92-96
 106. Ueda Y., Kakeya H. Reduction of Moiré in Multilayer Integral Imaging Display, *Proc. 19th International Display Workshops*. – 2012. – pp. 1176-1179
 107. Rogers G.L. A Simple Method of Calculating Moiré Patterns // *Proc. Physical Society*. – 1959. – vol. 73. – No 1. – p. 142-144
 108. Koike T., Oikawa M., Utsugi K. Moiré reduction for integral videography // *Proc. International Display Research Workshops*. – 2006. – pp. 1917-1918

109. Oku K., Tomizuka Y., Tanaka Y. Analysis and reduction of moiré in two-layered 3D display // SID Symposium Digest of Technical Papers. – 2007. – vol. 38. – pp. 437-440
110. Lebanon G., Bruckstein A.M. Variational approach to moiré pattern synthesis // Journal of the Optical Society of America A. – 2001. – vol. 18. – No 6. – pp. 1371-1382
111. Mochizuki J., Asano T. Study on Reduction Methods of Moiré Noise in Image Acquisition of Periodic Gray-Scale Patterns // Systems and Computers in Japan. – 2002. – vol. 33. – No 1. – pp. 27-37
112. Sidorov D.N., Kokaram A.C. Suppression of moiré patterns via spectral analysis // Proc. SPIE. – 2001. – vol. 4671. – pp. 895-906
113. Saveljev V. Spectral approach to measure moirés in 3D displays // Proc. 10th International Meeting on Information Display (IMID). – 2010. – pp. 348-349
114. Kennedy R.E., Cohen W.B., Schroeder T.A. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics // Remote Sensing of Environment. – 2007. – vol. 110. – pp. 370-386
115. Atev S., Miller G., Papanikolopoulos N.P. Clustering of vehicle trajectories // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2010. – vol. 11. – No 1. – pp. 647-657
116. Millioz F., Martin N. Circularity of the STFT and spectral kurtosis for time-frequency segmentation in Gaussian environment // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2011. – vol. 59. – No 1. – pp. 515-525
117. Chiang C. Moiré topography // Applied Optics. – 1975. – vol. 14. – No 1. – pp. 177-179
118. McCurry R.E. Multiple source moiré patterns // Journal of Applied Physics. – 1966. – vol. 37. – No 2. – pp. 467-472
119. Sciammarella C.A., Chiang F.-P. Gap effect on moiré patterns // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik (Journal of Applied Mathematics and Physics). – 1968. – vol. 19. – No 2. – pp. 326-333
120. Saveljev V., Kim S.-K. Finite-distance moiré effect in rotated gratings // Proceedings of 13th International Meeting on Information Display (IMID). – 2013. – p. 83.
121. 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.
122. Saveljev V., Kim S.-K. Theoretical estimation of moiré effect using spectral trajectories // Optics Express. – 2013. – vol. 21. – No 2. – pp. 1693 - 1712
123. Saveljev V., Kim S.-K. Simulation and measurement of moiré patterns at finite distance // Optics Express. – 2012. – vol. 20. – No 3. – pp. 2163-2177
- 124] Saveljev V., Kim S.-K. Experimental observation of moiré angles in parallax barrier 3D displays // Optics Express. – 2014. – vol. 22. – No 14. – pp. 17147-17157
125. Ali Z., Kim H.-E., Park J.-H., Kim N. Simplified Novel Look-Up Table Method using Compute Unified Device Architecture // 3D Research. – 2011. – vol. 2. – No 3. – p. 03002

126. Saveljev V., Kim S.-K. Estimation of moiré patterns using spectral trajectories in the complex plane // *Computer Technology and Application*. – 2012. – vol. 3. – No 5. – pp. 353-360
127. 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
128. Son J.-Y., Saveljev V.V., Kim J.-S., Kim S.-S., Javidi B. Viewing zones in 3-D imaging systems based on lenticular, parallax barrier and microlens-array plates // *Applied Optics*. – 2004. – vol. 43. – No 26. – pp. 4985-4992
129. 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.
130. 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
131. Bresenham J. E. Algorithm for computer control of a digital plotter // *IBM Systems Journal*. – 1965. – vol. 4. – No. 1. – pp. 25-30
132. Wright W.E., Parallelization of Bresenham's Line and Circle Algorithms // *IEEE Computer Graphics & Applications*. – 1990. – vol. 10. – No 5. – pp. 60-67
133. Liu X., Cheng K. 3D extension of Bresenham's algorithm and its application in straight-line interpretation // *Proc. Institution of Mechanical Engineers (IMEchE) Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2002. – vol. 216. – No 3. – pp. 459-463
134. Au C., Woo T. Three dimensional extension of Bresenham's Algorithm with Voronoi diagram // *Computer-Aided Design*. – 2011. – vol. 43. – pp. 417-426
135. 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, Бюл. № ...- ... с.
136. Устройство для определения порога стереоскопического зрения : авт. св. 1637759 СССР. МКИ А 61 В 3/08 / Осипов. – 1998
137. Binocular trainer : Патент 4506963 США / Cooper C.W. – 1981
138. Apparatus for testing stereoscopic vision : Патент 4035066 США / Slomski W.K. – 1977.
139. Saveljev V. Image and Observer Regions in 3D Displays // *Journal of Information Display*. – 2010. – vol. 11. – No 2. – pp. 21 - 28
140. Saveljev V. Geometric projective model of autostereoscopic 3D Display (invited paper) // *Proc. 10th International Meeting on Information Display*. – 2010. – pp. 247-248
141. 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 // *Proc. SPIE*. – 2000. – vol. 4297. – pp. 222-226

142. Son J.-Y., Saveljev V., Park M.-C., Kim S.-H. Viewing Zones in PLS Based Multiview 3-D Imaging Systems // *Journal of Display Technology*. – 2008. – vol. 4. – No 1. – pp. 109-114
143. Travis A.R.L., Lang S.R., Moore J.R., Dodgson N.A. Timemultiplexed three-dimensional video display // *SID Symposium Digest of Technical Papers*. – 1995. – pp. 851–853
144. van Berkel C., Clarke J.A. Characterization and optimization of 3D-LCD module design // *Proc. SPIE*. – 1997. – vol. 3012. – pp. 179–186.
145. Travis A.R.L. The display of three-dimensional video images // *Proc. IEEE*. – 1997. – vol. 85. – No. 11. – pp. 1817–1832
146. Jang J.-S., Jin F., Javidi B. Three dimensional integral imaging with large depth of focus by use of real and virtual image field // *Optics Letters*. – 2003. – vol. 28. – No 16. – pp. 1421–1423
147. Son J.-Y., Saveljev V., Kim D.-S., Kim S.-K., Park M.-C. Perceived images in IP and other multiview 3D imaging methods // *Proc. SPIE*. – 2005. – vol. 6016. – p. 60160N
148. 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
149. Son J.-Y., Saveljev V., Kim S.-K. Characteristics of Pixel Arrangements in Various Rhombuses for Full-parallax Three-dimensional Image Generation // *Applied Optics*. – 2006. – vol. 45. – No 12. – pp. 2689 - 2696
150. Son J.-Y., Saveljev V.V., Kim D.-S., Kwon Y.-M., Kim S.-H. Three-dimensional imaging system based on a light-emitting diode array // *Optical Engineering*. – 2007. – vol. 46. – No 10. – p. 103205-1
151. Cho S.-W., Park J.-H., Kim Y., Choi H., Kim J., Lee B. Convertible two-dimensional – three-dimensional display using an LED array based on modified integral imaging // *Optics Letters*. – 2006. – vol. 31. – No 19. – pp. 2852-2854
152. Saavedra G., Martinez-Cuenca R., Martinez-Corral M., Navarro H., Daneshpanah M., Javidi B. Digital slicing of 3D scenes by Fourier filtering of integral images // *Optics Express*. – 2008. – vol. 16. – pp. 17154-17160
153. 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 1. – No 1. – pp. 4913-4915.
154. Saveljev, V.V., Son, J.-Y., Kim, S.-H., Kim, D.-S., Park, M.-C., Song Y.-C. Image mixing in multiview threedimensional imaging systems // *Journal of Display Technology*. – 2008. – vol. 4. – No 3. – pp. 319-323
155. Son J.-Y., Javidi B. 3-dimensional imaging systems based on multiview images // *Journal of Display Technology*. – 2005. – vol. 1. – No 1. – pp. 125-140
156. Son J.-Y., Javidi B., Kwack K.-D. Methods for displaying 3 dimensional images // *Proc. IEEE*. – 2006. – vol. 94. – No 3. – pp. 502–523
157. Dodgson N.A. Analysis of the viewing zone of the Cambridge autostereoscopic display //

- Applied Optics. – 1996. – vol. 35. – No 10. – pp. 1705-1710
158. Jung J.-H., Park S.-G., Kim Y., Lee B. Integral imaging using a color filter pinhole array on a display panel // Optics Express. – 2012. – vol. 20. – No 17. – pp. 18744-18756
 159. Park J.-H., Kim H.-R., Kim Y., Kim J., Hong J., Lee S.-D., Lee B. Depth-enhanced three-dimensional - two-dimensional convertible display based on modified integral imaging // Optics Letters. – 2004. – vol. 29. – No 23. – pp. 2734 - 2736
 160. Siegel M., Lipton L. Virtual voxel: a quantitative figure of merit for autostereoscopic display technology and implementation // Proc. SPIE. – 2004. – vol. 5291. – p. 139
 161. 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
 162. Son J.-Y., Javidi B., Saveljev V. Synthesizing 3D images based on voxels // Proceedings of SPIE. – 2003. – vol. 5202. – pp. 1 - 11
 163. Pen E.F., Saveljev V.V. Multi-image stereograms in 3D visualization // Proceedings of SPIE. – 1999. – vol. 3733. – pp. 459 - 461
 164. Saveljev V., Son J.-Y., Kwack K.-D. Geometry-based quality metric for multi-view autostereoscopic 3D display // Proc. International Meeting on Information Display (IMID). – 2009. – pp. 1014-1017.
 165. 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) // Proc. SPIE. – 2007. – vol. 6778. – p. 677804.
 166. Son J.-Y., Saveljev V., Cha K.-H., Kim S.-K., Park M.-C., Jang S.-H. Stereo-Photography with Hand Phone // Proc. SPIE (keynote paper). – 2006. – vol. 6392. – p. 639205-1
 167. 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
 168. Saveljev V., Kim S.-K. Finite-distance Moiré Patterns in Autostereoscopic 3D Displays // Proc. 18th International Display Workshops (IDW). – 2011. – pp. 1841-1844
 169. Strang G. Computational Science and Engineering / Wellesley-Cambridge University. – 2007. – Chap. 4.1
 170. Saveljev V. Characteristics of Moiré Spectra in Autostereoscopic Three-dimensional Displays // Journal of Display Technology. – 2011. – vol. 7. – No 5. – pp. 259-266
 171. Artal P., Navarro R. Monochromatic modulation transfer function of the human eye for different pupil diameters: an analytical expression // Journal of Optical Society of America A. – 1994. – vol. 11. – pp. 246-249
 172. Saveljev V., Kim S.-K. Estimation of Moiré Patterns using Spectral Trajectories // Proc. 5th International Universal Communication Symposium. – 2011. – pp. 343-346
 173. 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.

174. 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.
175. Saveljev V., Kim S.-K. A Moiré Display // Proc. 19th International Display Workshops (IDW/AD'12). – 2012. – vol. 19. – pp. 1875-1877
176. Saveljev V., Kim S.-K. A 3D Moiré Display // Proc. 33rd International Display Research Conference (EuroDisplay). – 2013. – p. 54-56
177. Dogdson N.A. Variation and extrema of human interpupillary distance // Proc. SPIE. – 2004. – vol. 5291. – pp. 36 - 46
178. 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
179. 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
180. 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
181. 3D cursor or joystick device : Патент 7405726 США / Pelosi M.J. –2008
182. Park J.-H., Jung S., Choi H., Kim Y., Lee B. Depth extraction by use of a rectangular lens array and onedimensional elemental image modification // Applied Optics. – 2004. – vol. 43. – No 25. – pp. 4882-4895
183. Hwang D.-C., Lee K.-J., Kim S.-C., Kim E.-S. Extraction of location coordinates of 3-D objects from computationally reconstructed integral images basing on a blur metric // Optics Express. – 2008. – vol. 16. – No 6. – pp. 3623-3635

Приложение А. Модифицированный алгоритм Брезенхама
(из файла gprim.c).

```
Basic graphics primitives

    1. Incremental (Bresenham-like) line draw functions
      First written 29.9.95
*/

#include <string.h>
#include <ctype.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#include "gprim.h"
#include "mix.h"
#include "3dd.h"
#include "dosfont.h"
#include "pcxbmp.h"

// ----- Auxilliary class

class SortedOrt
{
public:
    int ActOrt;
    int cur;
    int last;
    int range; // Allways > 0
    int incr;
    int discr;

    SortedOrt( int actual, int start, int end );
    void operator++( void );
    void swap( SortedOrt **a, SortedOrt **b );
};

SortedOrt::SortedOrt( int actual, int start, int end )
{
    ActOrt = actual;
    cur = start;
    last = end;
    discr = 0;

    if( end > start )
    {
        range = end - start;
        incr = 1;
    }
    else
    {
        range = start - end;
```

```

        incr = -1;
    }
}

void SortedOrt::operator++( void )
{
    cur += incr;
}

void SortedOrt::swap( SortedOrt **a, SortedOrt **b )
{
    SortedOrt *tmp;

    tmp = *a;
    *a = *b;
    *b = tmp;
}

// ----- Functions for class VoxelBuf

VoxelBuf::VoxelBuf( size_t length )
{
    cur = start = (Voxel *) ( malloc( length * sizeof( Voxel ) ) );
    end = start + length;
    size = length;
    used = 0;

    CurFont = 0;
}

VoxelBuf::~VoxelBuf( void )
{
    free( start );
    delete CurFont;
}

size_t VoxelBuf::TrueSize( void )
{
    if( used < size ) // Greater is impossible
    {
        start = cur = (Voxel *) ( realloc( start, used *
sizeof( Voxel ) ) );
        end = start + used;

        size = used;
    }

    return( used );
}

int VoxelBuf::Put( Voxel *p )
{
    if( used < size )
    {
        *cur++ = *p;
        used++;
    }
}

```

```

        return( OK );
    }
    else
    {
        return( FAILED );
    }
}

Voxel *VoxelBuf::Get( void )
{
    return( cur++ );
}

Voxel& VoxelBuf::GetVox( void )
{
    return( *cur++ );
}

void VoxelBuf::Rewind( void )
{
    cur = start;
}

void VoxelBuf::Point( Voxel *loc )
{
    Put( loc );
}

int VoxelBuf::Line( Voxel *p1, Voxel *p2 )
{
    Point( p1 );          // First pixel is drawn immediately

    SortedOrt VirtX( 0, p1->Sheet, p2->Sheet );      // Make the virtual
axes
    SortedOrt VirtY( 1, p1->Row, p2->Row );
    SortedOrt VirtZ( 2, p1->Col, p2->Col );

    SortedOrt *v1 = &VirtX, *v2 = &VirtY, *v3 = &VirtZ;

    // Check the simplest cases
    if( v1->range == 0  &&  v2->range == 0  &&  v3->range == 0 )
        return 1;
    else if( v1->range <= 1  &&  v2->range <= 1  &&  v3->range <= 1 )
    {
        Point( p2 );
        return 2;
    }

    // Collate the ranges until v1->range > v2->range > v3->range
    if( v2->range > v1->range )
        v1->swap( &v1, &v2 );

    if( v3->range > v2->range )
    {

```

```

        v3->swap( &v3, &v2 );

        if( v2->range > v1->range )
            v2->swap( &v1, &v2 );
    }

    v1->last -= v1->incr;    // since the last pixel should be drawn
    directly

    // Incremental drawing
    while( v1->cur != v1->last )    // ? and if < 0
    {
        v2->discr += v2->range;

        if( 2 * v2->discr > v1->range )    // Isn't the time to make the
        lateral step?
        {
            v2->discr -= v1->range;

            v3->discr += v3->range;

            if( 2 * v3->discr > v2->range )    // Check lateral step
            at next ort
            {
                v3->discr -= v2->range;
                (*v3)++;
            }
            (*v2)++;
        }
        (*v1)++;

        union
        {
            Voxel d3;
            int d1[ 3 ];
        } place;

        place.d1[ v1->ActOrt ] = v1->cur;    // Unmap the virtual orts
        place.d1[ v2->ActOrt ] = v2->cur;
        place.d1[ v3->ActOrt ] = v3->cur;

        Point( &place.d3 );
    }

    Point( p2 );

    return v1->range;
}

int VoxelBuf::Line( Voxel *p1, Voxel *p2, unsigned char *Cliche )
// Draw a motley line.
// Cliche -- the MonoColoured stencil (as xGA videobuffer in mono modes)
{
    char CurByte = 0;

    if( Cliche != 0 )
        CurByte = char( *Cliche++ );

```

```

int BitNo = 7;

if( CurByte < 0 )
    Point( p1 );    // First pixel is drawn immediately

BitNo--;
CurByte <= 1;

SortedOrt VirtX( 0, p1->Sheet, p2->Sheet );    // Make the virtual
axes SortedOrt VirtY( 1, p1->Row, p2->Row );
SortedOrt VirtZ( 2, p1->Col, p2->Col );

SortedOrt *v1 = &VirtX, *v2 = &VirtY, *v3 = &VirtZ;

// Check the simplest cases
if( v1->range == 0  &&  v2->range == 0  &&  v3->range == 0 )
    return 1;

else if( v1->range <= 1  &&  v2->range <= 1  &&  v3->range <= 1 )
{
    if( CurByte < 0 )
        Point( p2 );

    return 2;
}

// Collate the ranges until v1->range > v2->range > v3->range
if( v2->range > v1->range )
    v1->swap( &v1, &v2 );

if( v3->range > v2->range )
{
    v3->swap( &v3, &v2 );

    if( v2->range > v1->range )
        v2->swap( &v1, &v2 );
}

v1->last -= v1->incr;    // since the last pixel should be drawn
directly

// Incremental drawing

while( v1->cur != v1->last )    // ? and if < 0
{
    v2->discr += v2->range;

    if( 2 * v2->discr > v1->range )    // Isn't the time to make the
lateral step?
    {
        v2->discr -= v1->range;

        v3->discr += v3->range;
    }
}

```

```

        if( 2 * v3->discr > v2->range ) // Check lateral step
at next ort
        {
            v3->discr -= v2->range;
            (*v3)++;
        }
        (*v2)++;
    }
    (*v1)++;

    if( CurByte < 0 )
    {
        union
        {
            Voxel d3;
            int d1[ 3 ];
        } place;

        place.d1[ v1->ActOrt ] = v1->cur; // Unmap the virtual
orts
        place.d1[ v2->ActOrt ] = v2->cur;
        place.d1[ v3->ActOrt ] = v3->cur;

        Point( &place.d3 );
    }

    if( BitNo > 0 )
    {
        BitNo--;
        CurByte <<= 1;
    }
    else
    {
        BitNo = 7;

        if( Cliche != 0 )
            CurByte = char( *Cliche++ );
        else
            CurByte = 0;
    }
}

if( CurByte < 0 )
    Point( p2 );

return v1->range;
}

```

Приложение Б. Пример файла 3DD

Простая снежинка и ее изображение

```

World system
L -0.125  0.428  0.000          0.000  0.500  0.000
L  0.000  0.500  0.000          0.125  0.428  0.000
L  0.125  0.428  0.000          0.125  0.217  0.000
L  0.125  0.217  0.000          0.308  0.322  0.000

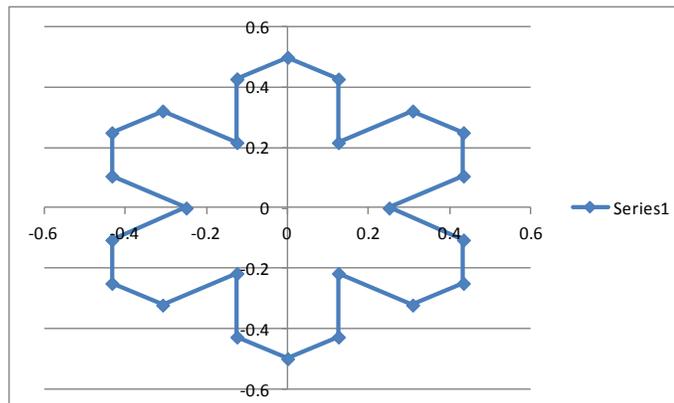
L  0.308  0.322  0.000          0.433  0.250  0.000
L  0.433  0.250  0.000          0.433  0.106  0.000
L  0.433  0.106  0.000          0.250  0.000  0.000
L  0.250  0.000  0.000          0.433 -0.106  0.000

L  0.433 -0.106  0.000          0.433 -0.250  0.000
L  0.433 -0.250  0.000          0.308 -0.322  0.000
L  0.308 -0.322  0.000          0.125 -0.217  0.000
L  0.125 -0.217  0.000          0.125 -0.428  0.000

L  0.125 -0.428  0.000          -0.000 -0.500  0.000
L -0.000 -0.500  0.000          -0.125 -0.428  0.000
L -0.125 -0.428  0.000          -0.125 -0.217  0.000
L -0.125 -0.217  0.000          -0.308 -0.322  0.000

L -0.308 -0.322  0.000          -0.433 -0.250  0.000
L -0.433 -0.250  0.000          -0.433 -0.106  0.000
L -0.433 -0.106  0.000          -0.250 -0.000  0.000
L -0.250 -0.000  0.000          -0.433  0.106  0.000

L -0.433  0.106  0.000          -0.433  0.250  0.000
L -0.433  0.250  0.000          -0.308  0.322  0.000
L -0.308  0.322  0.000          -0.125  0.217  0.000
L -0.125  0.217  0.000          -0.125  0.428  0.000
    
```



Приложение В. Структуры данных драйвера

```
class Book {
    friend class IntWireFrame;
    int Sheet;
    int Row;
    int Col; };

class Connection {
    friend class IntWireFrame;
public: void Fix( int a, int b );
        int operator ==( Connection &Src );
        int operator !=( Connection &Src );
private: unsigned int From;
        unsigned int To; };

class IntWireFrame {
public: IntWireFrame( WireFrame *WorldWireFrame );
        ~IntWireFrame();
private: unsigned int VertexCnt;
        Book far * Vertex; // Массив координат вершин // (длина,
возможно не требуется)
        unsigned int EdgeCnt;
        Connection far * Edge; // Массив описателей рёбер };

struct Page {
    unsigned char Row;
    unsigned char Column; };

struct Cell {
    unsigned char PairCnt;
    unsigned char CellPos;
    unsigned int Pair[ PairCnt ]; }
```

Приложение Г. Функции на языке ассемблера

```

void DrawSheet( Cell _es *Cur )
{
    _ES = EmsSegment;
    for( ; Cur->PairCnt != 0; Cur = (Cell _es *) ( _SI ) )
    {
        _ES = EmsSegment;
        outportw( CosmoSlowStage, Cur->Attr );
        _SI = (unsigned int) ( Cur->Pair );
        _CX = Cur->PairCnt;
        _DX = CosmoFastStage;
        asm          push  ds;
                   _DS = _ES;
        asm rep      outsw;
        asm          pop   ds;
                   if( NextLS() )
                                return;
    }
}

void interrupt DrawFrame( void )          // ! Assembler code for VOID FAR !
{
    RenewSync();
    EmsDoor16K( EmsHandle, 0 );
    WaitFS();

    unsigned int    Off = 0; // < 16K
    int             CurEmsPage = 0;
    int             InDoorInc = (int)( Cosmos.SheetKbSz *
Kbyte );

    for( int CurSheet = 0; CurSheet < Cosmos.Sheets; CurSheet++ )
    {
        WaitLS();
        // _ES isn't important here, since arg. is OFFSET
        DrawSheet( (Cell _es *) ( Off ) );

        // InDoorInc in BYTES, thus CurCell isn't incremented
        Off += InDoorInc;

        if( Off >= EmsPage )
        {
            CurEmsPage++;
            EmsDoor16K( EmsHandle, CurEmsPage );
            Off = 0;
        }
    }
}

```