

# КИНОМЕХАНИК

НОВЫЕ ФИЛЬМЫ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ

МАССОВО-ТЕХНИЧЕСКИЙ

ЖУРНАЛ

9/2006

# А.С.К.

группа компаний

ОБОРУДОВАНИЕ КИНОТЕАТРОВ.  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОНТАЖ, ГАРАНТИЯ.



А.С.К. ГРУППА КОМПАНИЙ

[www.ackgroup.ru](http://www.ackgroup.ru), e-mail: [info@ackgroup.ru](mailto:info@ackgroup.ru)

Россия, 117571, Москва, ул. 26 Бакинских Комиссаров, 9

Аудитория С.К.° (495) 510 2552, офис 44

Арт Саунд К.° (495) 510 2550, офис 37

DEMO SPEC



ISCOOPTIC

LIGHTING-EDGE TECHNOLOGIES

USHIO

DOLBY  
DIGITAL

K.C.S.

KEOLONIK CINEMA SOUND



# ТРЕХМЕРНЫЙ ДИСПЛЕЙ: ВЫБОР РЕАЛИЗУЕМЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ<sup>1</sup>

В.Ежов

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ФАКТОРОВ, АПРИОРНО ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ РЕАЛИЗУЕМОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ БАЗОВЫХ КЛАССОВ ТРЕХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЕВ

Одна группа первичных факторов присуща собственно техническим решениям (их классам или подклассам), из них основными являются следующие физико-технические факторы: критическое ограничение, параметры рабочей среды, параметры источника информационного сигнала.

Другую группу первичных факторов составляют психофизиологические особенности зрительного восприятия трехмерных образов человеком. Поскольку выходное изображение трехмерного дисплея всегда воспринимается человеческим зрением напрямую, грамотная оценка практической ценности трехмерных дисплеев невозможна без учета фундаментальных свойств объемного видения человека.

### 2.1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ПРИСУЩИЕ СОБСТВЕННО ТЕХНИЧЕСКИМ РЕШЕНИЯМ

**Критическое ограничение решения (класса, подкласса).** Определим критическое ограничение технических решений как такое принципиальное физико-техническое ограничение, которое само-

стоятельно диктует практическую ценность (реализуемость и перспективность) некоторой группы (класса) предложений (решений) вне зависимости от теоретических достоинств последних.

Скажем, критическим ограничением такого класса предложений, как «вечный двигатель» (первого рода – термодинамически изолированная система), является невозможность на современном уровне развития техники практической реализации 100-процентного к. п. д., что ведет к нулевой практической ценности подобных предложений независимо от чисто теоретических (гипотетических) достоинств такого «двигателя» по всем остальным техническим параметрам.

Наличие критического ограничения не является обязательным для произвольного класса (подкласса), но коль скоро такое ограничение существует, совершенно необходимо его выявить, если целью является построение практически конкурентоспособного трехмерного дисплея.

**Требуемые параметры рабочей среды.** Без участия рабочей среды никакой из дисплеев невозможно реализовать. Рабочей средой трехмерного дисплея является динамическая реверсивная среда, в пространстве (в веществе) которой осуществляется физическая запись и воспроизведение образа трехмерной сцены. Практическую реализуемость подклассов трехмерных дисплеев в первую очередь следует оценивать по возможности физической реализации рабочей среды с требуемым разрешением, быстродействием, оптической эффективностью, контрастом и размерностью.

<sup>1</sup> Продолжение. Начало см. в № 8, 2006 г.

Так, игнорирование отсутствия адекватной рабочей среды (скоростных высокоразрешающих пространственно-временных оптических модуляторов с электрическим или оптическим входом) явилось одной из основных причин полного провала попытки построения оптических вычислительных комплексов в 80-х годах прошлого века в исследовательских группах всего мира, несмотря на разработку массы математических алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов. Только в области оптической (когерентной) обработки радиосигналов (сигналов с ВЧ и СВЧ несущей) были реализованы практические оптические корреляторы и спектроанализаторы, конкурентоспособные с аналогичными электронными устройствами, во многом благодаря наличию таких быстродействующих и высокоточных устройств ввода радиосигналов, как акустооптические модуляторы (АОМ).

**Требуемые параметры источника информационного сигнала.** Нельзя реализовать в полной мере потенциальные возможности дисплея без наличия соответствующего источника информационного сигнала. Для трехмерных дисплеев невозможность практической реализации адекватных им источников сигнала в некоторой сфере применения, естественно, станет непреодолимым препятствием к их применению в данной сфере. Первостепенное значение имеет реализуемость датчика требуемой размерности. Например, для объемного отображения сцен реального мира не обойтись без 2- или 3-координатного датчика (в зависимости от принципа работы дисплея – с 2-

или 3-координатной разверткой). Столь же необходимо оценивать величину требуемой пропускной способности (информационный поток в бит/сек) для линии связи датчика с дисплеем.

## 2.2. ОСОБЕННОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ОБРАЗОВ ЧЕЛОВЕКОМ

От трехмерных дисплеев в общем случае требуется воспроизводить такие объемные изображения, при восприятии которых зрение человека будет функционировать столь же естественно и комфортно, как и при наблюдении привычных объектов реального мира. Проиллюстрируем, как зрение человека воспринимает объекты реального мира (рис. 5), и кратко рассмотрим основные психофизиологические особенности их восприятия.

**Бинокулярный параллакс как основной параметр объемного отображения** соответствует величине горизонтального сдвига (длине отрезка  $P$  на рис.2) для соответствующих точек двух ракурсов, составляющих стереопару. Именно этот анализируемый зрением человека сдвиг (бинокулярный параллакс) несет в себе основную информацию о расположении по глубине сцены всех ее объектов, состоящих из указанных точек. Бинокулярный параллакс является информационной основой бинокулярного зрения, которое, в свою очередь, является основой восприятия объема человеком при наблюдении изображений от трехмерных дисплеев всех классов.

**Согласованность зрительной аккомодации и конвергенции.** Аккомодацией называется способ-

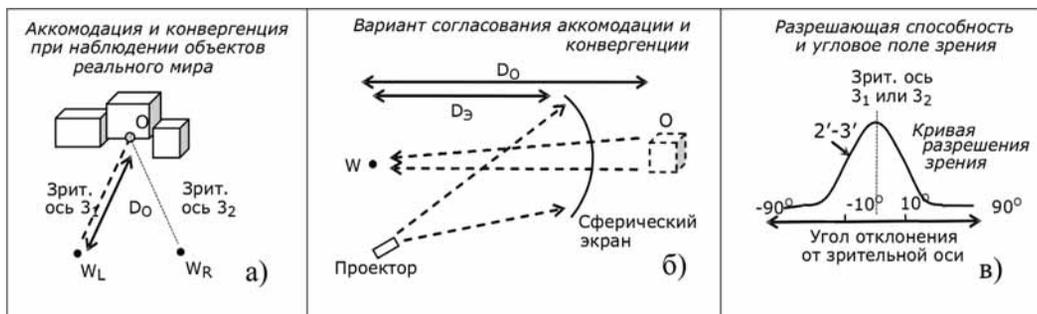


Рис.5. Особенности зрительного восприятия

ность глаз фокусироваться на любой точке воспринимаемого объекта (точке  $O$  на рис. 5,а) в соответствии с ее расстоянием  $D_0$  от окон наблюдения  $W_L$ ,  $W_R$  (левого и правого глаз). Аккомодация осуществляется за счет соответствующего изменения кривизны поверхности хрусталиков глаза, осуществляемого глазными мышцами. Конвергенция – это способность глаз изменять направления зрительных осей ( $Z_1$  и  $Z_2$  на рис. 5,а) так, чтобы последние пересекались в наблюдаемой точке  $O$  объекта. При наблюдении объектов реального мира аккомодация и конвергенция всегда согласованы между собой, то есть для любой наблюдаемой точки  $O$  глаза сфокусированы на ней, а зрительные оси глаз также пересекаются в этой точке.

При наблюдении опосредованных (формируемых дисплеями) трехмерных изображений это условие часто нарушается, особенно в простых стереоскопических дисплеях. При рассмотрении двух плоских проекций (ракурсов), воспроизводимых в плоскости рабочей среды (рис.2,а), аккомодация зрения (фокусировка глаз) осуществляется на плоскости экрана дисплея. В то же время для восприятия объемного изображения любой точки  $O$  конвергенция зрения (пересечение зрительных осей глаз) должна осуществляться в той точке пространства, где расположено кажущееся изображение указанной точки. В результате такого рассогласования между аккомодацией и конвергенцией глаз возникает дискомфорт в работе зрительного аппарата, приводящий к повышенной утомляемости зрения.

Тем не менее, указанное рассогласование не является непременным спутником любых стереоскопических систем. Улучшить согласование аккомодации и конвергенции можно в простейшем случае существенным физическим удалением экрана от наблюдателя либо оптическим «удалением» экрана, например, с использованием неплоского (сферического) экрана (рис.5,б), который работает в качестве фокусирующего элемента и отдаляет наблюдаемый объект  $O$  (наподобие зонной картины Френеля в голограмме, которая не дает глазу фокусироваться на поверхности самой поверхности голограммы). Это не означает, что

все объекты отображаемой сцены будут отображаться в бесконечности, они будут отображаться во всем пространстве в соответствии с параллаксами между левым и правым ракурсами. Пути устранения указанного рассогласования есть одно из основных направлений развития стереоскопических систем.

Для случая дисплеев с 3-координатной разверткой аккомодация и конвергенция всегда согласованы между собой, что и является основной теоретической мотивацией к разработке данного класса дисплеев.

При наблюдении изображений, восстановленных с голограмм, также всегда выполняется условие согласования аккомодации и конвергенции, поскольку глаза не фокусируются на поверхности самой голограммы вследствие того, что голографическая запись состоит из зонных картин Френеля, характеризующихся фокусирующими свойствами, и глаза не могут аккомодироваться на плоскости таких оптических элементов, как они не могут аккомодироваться на стеклянных линзах.

#### ***Панорамный обзор (периферийное зрение).***

Даже если наблюдатель смотрит постоянно в одном направлении, он все равно воспринимает окружающие объекты в пределах углового поля размерами до  $\pm 90^\circ$  относительно направления зрительной оси глаза, то есть восприятие осуществляется постоянно в суммарном угловом поле зрения  $180^\circ$ . При этом наивысшая разрешающая способность зрения (две три угловые минуты,  $2'-3'$ ) существует только в достаточно узком угловом поле  $\pm 10^\circ$  относительно зрительной оси (рис. 4,в), и потому для построения панорамных дисплеев можно формировать изображение с высоким разрешением не по всему угловому полю восприятия, а только в направлении взгляда наблюдателя<sup>2</sup>. В периферийной части изображения достаточно формировать лишь фоновое изображение с низким разрешением.

В стереоскопических дисплеях можно реализовать объемное панорамное изображение с любыми углами за счет стыковки границ парциальных изображений с обычными угловыми характеристиками, оста-

<sup>2</sup> Направление взгляда наблюдателя складывается из направления поворота головы и направления поворота глаз.

ваясь при этом в разумных пределах стоимости и габаритов дисплея.

В дисплеях с 3-координатной разверткой на практике практически невозможно получать панорамные изображения за счет стыковки дисплеев, а делать единый панорамный дисплей данного класса априори технически и экономически нецелесообразно.

В голографических дисплеях возможно применение состыкованных изображений с ряда голограмм.

**Полиракурсное восприятие.** При наблюдении объектов реального мира, если наблюдатель передвигается из стороны в сторону, он видит разные ракурсы сцены, которые меняются непрерывно (плавно), то есть осуществляется непрерывно-полиракурсное восприятие объектов.

В стереоскопических дисплеях полиракурсное отображение реализуется методом пространственного мультиплексирования ракурсов.

В дисплеях с 3-координатной разверткой полиракурсное отображение произвольной объемной сцены невозможно (см. раздел 3.1) без применения метода пространственного мультиплексирования, который в данном случае ведет к крайне громоздкой системе, причем этот метод можно реализовать только для случая единственного наблюдателя.

В голографических дисплеях в принципе интегрально реализуется непрерывно-полиракурсное восприятие, поскольку одновременно представлен весь угловой спектр ракурсов в единой голограмме (в пределах ее угловой апертуры).

**Эффект оглядывания (саккады – saccads).** Глаз человека постоянно совершает непроизвольные скачкообразные угловые движения (саккадические движения), которые позволяют, в частности, осуществить оглядывание наблюдаемого объекта даже при полностью неподвижной голове наблюдателя. Функционированием эффекта оглядывания некоторые исследователи склонны объяснять наличие «живости» восприятия объектов реального мира.

В стереоскопических дисплеях эффект оглядывания реализовать сложно, но именно его отсутствием отдельные исследователи объясняют некоторую «сухость» («картонность») наблюдаемых сцен. Все же при необходимости этот эффект может быть реализован в стереоскопических дисплеях с использованием устройств слежения за положением глаз<sup>3</sup> и соответствующей тонкой «подстройкой» структуры наблюдаемых ракурсов.

В голографических дисплеях эффект оглядывания присутствует естественным образом, поскольку в голограмме записаны все ракурсы сцены, включая последние с минимальными отклонениями по углу восприятия.

В дисплеях с 3-координатной разверткой эффект оглядывания теоретически присутствует, однако практически при наблюдении трехмерного изображения произвольного вида из-за наличия строгой угловой селективности эффект оглядывания станет некорректным (см. раздел 3.1).

**Прочие психо-физиологические факторы.** В целом восприятие человеком глубины сцен носит очень сложный характер и включает в себя множество дополнительных зрительных факторов, необходимость полного учета которых не безусловна при традиционном подходе к построению трехмерных дисплеев в общем случае, поскольку эти факторы не являются спецификой собственно объемного зрения, а лишь косвенно способствуют ему.

Иногда строят простейшие оптические устройства, максимально «эксплуатирующие» какие-либо отдельные факторы зрения, создающие иллюзию объемного восприятия, например эффект Пульфрича (Pulfrich) или цветовой расслоение объектов (chromostereopsis).

Получаемый подобным образом эффект объемности может иметь мало общего с истинно объемной структурой наблюдаемой сцены, а потому такие устройства нельзя классифицировать как трехмерные дисплеи, так как они предназначены не для документального отображения, а являются скорее визуальными аттракционами.

<sup>3</sup> Такие устройства слежения уже не являются экзотикой, а реально реализованы даже в некоторых бытовых видеокамерах.

### 3. СОПОСТАВЛЕНИЕ БАЗОВЫХ КЛАССОВ (ПОДКЛАССОВ) ТРЕХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЕВ, ИСХОДЯ ИЗ ПЕРВИЧНЫХ ФАКТОРОВ РЕАЛИЗУЕМОСТИ И ПЕРСПЕКТИВНОСТИ

#### 3.1. ПОДКЛАСС «3-КООРДИНАТНЫЕ ДИСПЛЕИ» (VOLUMETRIC DISPLAYS)

*Физико-технический признак подкласса – трехмерный объектный образ*

**Критическое ограничение подкласса – острая угловая селективность образа.** Все дисплеи данного подкласса способны корректно формировать образ только в одном, заранее определенном направлении наблюдения (корректно формируется только единственный, заранее заданный ракурс в предъявляемом наблюдателю произвольном образе). Приведем краткое доказательство факта угловой селективности с позиций геометрической оптики.

Рассмотрим простейший трехмерный предметный образ, состоящий из светящейся точки  $S$  и непрозрачного прямоугольника  $P$  (рис.6). Наблюдатель  $W_1$  со своего углового положения должен видеть как точку  $S$ , так и прямоугольник  $P$ , а наблюдатель  $W_2$  – только прямоугольник  $P$  (из-за блокирования прямоугольником света от точки). Ясно, что одна и та же оптическая среда принципиально не может одновременно сформировать два таких разных объемных изображения (точку с прямоугольником для наблюдателя  $W_1$  одно-

временно с прямоугольником без точки для наблюдателя  $W_2$ ), а может формировать только одно из этих изображений. Поэтому здесь требуется сначала задать угловое положение единственного наблюдателя, и только потом можно сформировать соответствующий единственный ракурс пространственного образа.

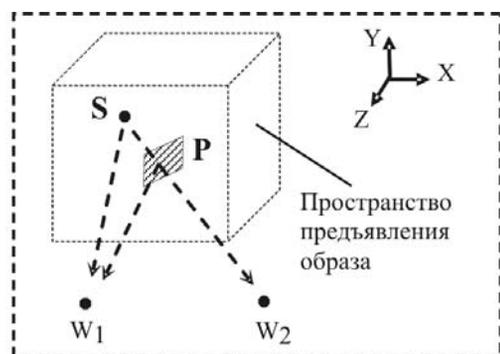
В сценах реального мира близкие (к наблюдателю) объекты заслоняют (частично или полностью) дальние вследствие оптических свойств вещества, из которого они состоят. В визуальном образе, поскольку все его объекты одинаково прозрачны, требуемое «загораживание» должна осуществлять программа – источник сигнала, имитируя оптические свойства вещества. Но программа не может осуществлять «загораживание» сразу по всем возможным направлениям наблюдения, ей требуется информация о конкретном угле наблюдения, то есть о положении наблюдателя, откуда автоматически вытекает угловая селективность предъявляемого визуального образа.

Поэтому предъявляемый образ здесь нельзя наблюдать с разных сторон – фиксированное направление наблюдения должно быть задано заранее. Во всех иных направлениях наблюдаемый произвольный образ (состоящий, например, из сплошных объектов, в том числе прозрачных и полупрозрачных) предъявляется некорректно, без соблюдения требуемого перекрытия (occlusion) частей одних объектов сцены частями других (задние объекты «просвечивают» сквозь передние).

Единственное исключение – корректно предъявляются для любого направления наблюдения только каркасные («проволочные») модели-образы, состоящие исключительно из точечных источников света и исчезающе-тонких световых линий, для которых не требуется осуществлять указанное «затенение».

**Дискретность по координате  $Z$ .** Поскольку имеет место прямая дискретизация отображаемого объекта по всем трем координатам, для корректного отображения произвольных сцен необходимо иметь форму рабочей среды типа куба или другой равносоставленной геометрической фигуры при одинаково мелком шаге пикселей по всем трем координатам. В противном случае для корректного («неизломанного»)

Рис. 6



отображения надо соответственно «сжимать» рабочую среду по указанной координате, что резко сужает функциональные возможности рассматриваемого дисплея, либо будет наблюдаться сильная «изломанность» линий объектов<sup>5</sup>, особенно губительная именно для объектов каркасного типа – единственно варианта изображения, который мог бы корректно отображаться такими дисплеями.

**Проблема с многоракурсностью (то есть с «обходом» вокруг изображения наблюдателями).** Многокурсности в случае единственного наблюдателя не достичь без обратной связи на вход дисплея, сообщающей информацию о положении наблюдателя. Но наличие такой обратной связи вообще лишено смысла в случае двух или нескольких наблюдателей, поскольку корректный произвольный образ можно сформировать лишь в одном направлении (в направлении только одного из наблюдателей). Это означает, что два (и более) наблюдателя, находящиеся в разных положениях, не смогут в принципе (с обратной связью или без) одновременно корректно воспринимать один и тот же произвольный образ, генерируемый дисплеями данного подкласса.

**Требуемые параметры рабочей среды.** Предъявляются очень высокие требования к быстродействию двумерной рабочей среды, применяемой для формирования в «слое» объектного образа. Кадровая частота работы такой среды должна в М раз превышать кадровую частоту работы среды в дисплее с двумерными проекциями (где М – число указанных «слоев»). Данный факт накладывает существенное ограничение на число реальных «слоев», которое можно использовать.

**Требуемые параметры источника информации сигнала.** Поскольку объектный образ представлен М слоями, то необходим датчик информационного сигнала, генерирующий парциальные сигналы всех М слоев. В случае съема информации о сценах реального мира пока еще трудно представить, как по-

строить требуемый 3-координатный датчик, обеспечивающий «послойный» съем информации о произвольной реальной сцене большой протяженности.

Отсюда ясна бесполезность попыток использования дисплеев указанного класса для отображения сцен реального мира вследствие крайней сложности (если не сказать о практической невозможности) построения соответствующего 3-координатного датчика съема информации.

Практически реально реализовать лишь соответствующий датчик компьютерно-синтезированных сцен для этих дисплеев.

**Учет психофизиологических факторов восприятия.** В силу острой угловой селективности образа невозможно реализовать *поликурсное восприятие*. Можно воспринимать только один ракурс произвольного образа, причем любые изменения положения головы (или позиции наблюдателя в целом) приведут к вышеуказанному неадекватному восприятию образа.

Практически невозможно обеспечить *панорамность* восприятия, так как для данного подкласса образ сцены всегда сосредоточен целиком внутри пространства рабочей среды дисплея (внутри пространства предъявления образа), а это пространство не может реально превышать, например, куб с гранью размером около 17 дюймов, что ограничивает угол зрения.

Из всех факторов, способствующих повышению реалистичности восприятия сцен, только эффект *оглядывания* изредка может быть успешно реализован для определенных сцен – изменения угла наблюдения при саккадах («скачках») глаз столь малы, что могут не выходить за пределы, накладываемые имеющейся угловой селективностью в наблюдаемом трехмерном оптическом образе. Хотя и эффект оглядывания в этом случае теоретически некорректен для произвольного образа.

При наблюдении объектного трехмерного образа принципиально отсутствует *рассогласование* между аккомодацией и конвергенцией зрения (как и при наблюдении объектов реального мира), поэтому в рассматриваемом случае нет предпосылок к возникновению утомляемости зрения.

*Продолжение следует*

<sup>4</sup>При малом числе пикселей по координате Z.

<sup>5</sup>Если все же сохранить глубину отображаемого пространства по координате Z.